Konzipierung und Umsetzung eines Unterstützungssystems zur vergleichenden Bewertung von Luftfahrzeugen

Sten Morawietz

Vollständiger Abdruck der bei der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Stütz
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Hornung

Die Dissertation wurde am 04.10.2018 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 14.02.2019 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 07.03.2019 statt.

„An den Scheidewegen des Lebens stehen keine Wegweiser."

Charlie Chaplin (1889 - 1977)
britischer Schauspieler und Regisseur

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Luftfahrttechnik des Instituts für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München. Ich möchte in den folgenden Zeilen all denjenigen Danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und mich sowohl in fachlicher wie auch persönlicher Hinsicht unterstützt haben.

An dieser Stelle danke ich zuerst Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Peter Stütz, welcher als mein Doktorvater und Diskussionspartner diese Arbeit ermöglicht, vorangetrieben und dieser schlussendlich zum Abschluss verholfen hat. Für die Möglichkeit, meine akademische Laufbahn nach dem Studium und den studentischen Arbeiten an Ihrem Institut fortsetzen zu können, möchte ich mich herzlich bedanken. Ich werde die schöne Zeit am Institut vermissen.

Mein Dank gilt weiterhin der Vorsitzenden des Prüfungsausschusses Frau Universitätsprofessorin Dr.-Ing. Kristin Paetzold. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei dem zweiten Berichterstatter Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Mirko Hornung für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Einen besonderen Dank hat der Akademische Direktor der Professur für Luftfahrttechnik Herr Dr.-Ing. Michael (Mike) Strohal verdient, der mir sowohl fachlich als auch menschlich immer zur Seite stand und einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat. Die konstruktiven Diskussionen, die ich mit Dr. Strohal und Prof. Stütz während meiner Promotionszeit führen konnte, haben wesentliche Impulse und Anregungen geliefert, die entscheidend zu meiner Motivation und letztlich zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen haben.

Allen Kollegen des Institutes für Flugsysteme danke ich für die konstruktiven Fachgespräche, Gesprächsrunden und auch den privaten Austausch über die Arbeit hinaus.

Ebenfalls ein großer Dank gilt meiner Familie, die mich vor und während der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter unterstützt und entbehrt hat. Meinen Eltern danke ich für die Freiheit, dass ich stets meinen eigenen Weg gehen durfte und sie mich dabei unterstützt haben. Abschließend möchte ich meiner geliebten Frau Lena danken, dafür, dass sie den Umzug nach München gewagt hat und mir all die Zeit verständnisvoll und vor allem unterstützend zur Seite stand. Sie musste in letzter Zeit viel zu oft auf ihren Ehemann verzichten. Ich gelobe Besserung und freue mich auf die gemeinsame Zukunft mit unserer kleinen Tochter Alina und die freien Wochenenden.

Pirna, 15.03.2019 Sten Morawietz

Kurzfassung

Zivile und militärische Luftfahrzeuge werden allgemein zur Erfüllung von Transport-, Luft- Luft-, Luft-Boden- und Aufklärungsmissionen konzipiert und eingesetzt. Dabei werden gegensätzliche Leistungsanforderungen wie bspw. gute Flugleistungen, hohe Überlebensfähigkeit, hohe Aufklärungsleistung, All-Wetter-Einsatzfähigkeit sowie ökologische und ökonomische Anforderungen wie bspw. Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und geringe Anschaffungskosten formuliert, welche widersprüchliche Konsequenzen für die Auslegung haben und zwangsläufig zu einer Kompromisslösung führen.

Allgemein ist der Entwurf bzw. die Beschaffung eines Luftfahrzeuges ein Prozess von Auswahlentscheidungen. Dabei stehen meist mehrere Alternativen zur Auswahl, aus denen das geeignetste System zur Erfüllung einer (mehrerer) Mission(en) zu bestimmen ist. Damit geht der Auswahlentscheidung eine ganzheitliche Systembewertung voraus. Zum Treffen einer solchen Auswahlentscheidung im Entwurfs- bzw. Beschaffungsprozess als auch bei der Identifikation von *Fähigkeitslücken*[1] oder der Ableitung optimaler Systemanforderungen müssen Fähigkeiten gegeneinander abgewogen werden. Dazu ist ein komplizierter Bewertungsprozess durchzuführen, welcher typischerweise über das hinausgeht, was ein Entscheidungsträger intuitiv erfassen und systematisch bzw. objektiv verarbeiten und damit bewerten kann.

Dem gegenüber steht die endliche Fähigkeit des Menschen, Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. Evolutionsbedingt sind diese Fähigkeiten, komplexe Entscheidungssituationen ganzheitlich zu erfassen und zu begreifen, nicht ausreichend ausgeprägt. Bei komplexen Bewertungsaufgaben wie dem Bewerten luftgestützter Systeme ist das menschliche Urteilsvermögen mit dessen Heuristiken überfordert. Zur Unterstützung scheint daher ein Ansatz angezeigt, welcher den komplexen Bewertungsprozess methodisch strukturiert und das Ergebnis transparent ableitet sowie reproduzierbar aufbereitet. Dies motiviert die Bereitstellung von Entscheidungsunterstützungssystemen zur Ableitung transparenter und reproduzierbarer Entscheidungen mit rechnergestützten Methoden zur Systembewertung und -auswahl.

Ausgehend von dem Gegenspiel zwischen den begrenzten kognitiven Ressourcen des Entscheidungsträgers und der Komplexität von Auswahlentscheidungen luftgestützter Systeme wurde in dieser Arbeit ein solcher Ansatz entwickelt, welcher eine strukturierte, missionsorientierte Bewertung von Luftfahrzeugen ermöglicht. Dabei werden ausgehend von der Nutzenabsicht (Mission(en)) des luftgestützten Systems beschreibende Fähigkeitsbausteine zusammen mit deskriptiven Kriterien genutzt, um daraus ein Potential zur Missionserfüllung zu bestimmen. Die Zusammensetzung des Ergebnisses wird für den Entscheidungsträger transparent aufbereitet und der Bewertungs- bzw. Entscheidungsprozess wird objektiviert und reproduzierbar.

---

[1] Der Begriff *Fähigkeitslücke* wurde in dem Ausrüstungs- und Nutzungsprozess der Bundeswehr (Bundesministerium der Verteidigung 2012) definiert und ist *„ein qualitatives oder quantitatives Defizit im Leistungsvermögen. Ein Defizit kann bei Zielen, Funktionalitäten und/oder Ressourcen bestehen.“* (http://www.planungsamt.bundeswehr.de/portal/a/plgabw/start/grundlagen/glossar, zuletzt besucht am 02.09.2018)

Die zugrundeliegende Methodik besteht aus einem *Makro-Konzept* – welches den Rahmen für das Unterstützungssystem zur Ableitung einer Auswahlentscheidung darstellt – und einem *Mikro-Konzept* – welches als Datenbasis für die Bewertung dient und das notwendige Expertenwissen enthält. Die Methodik wird in dieser Arbeit am Beispiel militärischer Luftfahrzeugvergleiche bzw. -beschaffungen verdeutlicht.

Diese Methodik wurde prototypisch implementiert und enthält *A-Priori* Expertenwissen (bspw. Metriken, Gewichtungen und Präferenzfunktionen), welches in ausgewählten Bereichen mit Experten (Piloten, Systemspezialisten, Bewerter) im Rahmen von Wissensakquisitionen aufgebaut wurde. Damit wurde es möglich,

- missionsorientierte Systembewertungen inklusive einer Analyse der Bewertungsergebnisse zur Unterstützung von Auswahlentscheidungen durchzuführen und die Ableitung von Systemanforderungen zu unterstützen (Welche Anforderungen (*Requirements*) muss ein Luftfahrzeug erfüllen, damit es „*dominant*“ oder „*gut genug*“ ist?),
- Bedrohungsanalysen von Luftfahrzeugen im direkten Vergleich durchzuführen sowie Stärken und Schwächen zu identifizieren und Modifikationen zu bewerten.

Das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem (*DESFACE*: ***DE**cision **S**upport **F**ramework for **A**ir-**C**raft **E**valuation*) wurde in einem realitätsnahen Anwendungsfall mit entsprechenden Entscheidungsträgern validiert. Dazu wurde ein Referenzvorgehen implementiert und ebenfalls durch die Versuchspersonen zur Bearbeitung einer komplexen Bewertungsaufgabe und Ableitung einer Auswahlentscheidung angewandt. Dabei konnte eine signifikante Verbesserung für *DESFACE* sowohl in der strukturierten Unterstützung des Bewertungsprozesses selbst als auch in der Ergebnisanalyse für eine plattformspezifische Bewertung gezeigt werden. Daher wurde mit *DESFACE* ein möglicher Ansatz entwickelt, welcher eine *missionsorientierte*, *transparente*, *nachvollziehbare, robuste* und *objektive* Bewertung von Luftfahrzeugen unterstützt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sowohl die Strukturiertheit des Bewertungsprozesses als auch die Nachvollziehbarkeit der Bewertungsergebnisse und damit der Vertrauensgrad in die Ergebnisse deutlich gesteigert werden konnte. Dadurch wurde von Seiten der Entscheidungsträger ein deutlicher Nutzungswunsch dieser Methodik zur Unterstützung aktueller und zukünftiger Auswahlentscheidungen formuliert.

Zusammenfassend wurde in dieser Arbeit ein Unterstützungssystem zur Ableitung einer Auswahlentscheidung von luftgestützten Systemen konzipiert, welches eine signifikante Verbesserung zu dem bisherigen Vorgehen zur Durchführung einer Systembewertung bzw. Ableitung einer Auswahlentscheidung darstellt.

Abstract

Civil and military aircraft are generally designed and used for transport, air to air, air to ground and reconnaissance missions. Contradictory performance requirements such as good flight performance, high survivability, high reconnaissance performance, all-weather capability as well as ecological and economic requirements such as environmental compatibility, economy and low acquisition costs are formulated, which have contradictory consequences for the design and inevitably lead to a compromise solution.

In general, the design or procurement of an aircraft is a process of selection decisions. Several alternatives are usually available from which the most suitable system for fulfilling a (several) mission(s) has to be determined. This is preceded by an integrated system evaluation of the resulting selection decision. In order to make such a selection decision in the design or procurement process as well as in the identification of capability gaps or the derivation of optimal system requirements, capabilities must be weighed up against each other. This requires a complicated evaluation process, which typically goes beyond what a decision maker can intuitively grasp and systematically or objectively process and thus evaluate.

On contrary to that, human decision makers have a finite ability to absorb and process information. Due to evolution, these abilities to grasp and understand complex decision-making situations holistically are not sufficiently developed. In complex evaluation tasks such as the evaluation of airborne systems, human judgement is overwhelmed with its heuristics. An approach seems to be appropriate, that structures the complex assessment process methodically and derives the result transparently and prepares it in a reproducible manner. This motivates the provision of decision support systems for making transparent and reproducible decisions with computer-aided methods for system evaluation and selection.

Based on the contrast between the limited cognitive resources of the decision maker and the complexity of a selection decision of airborne systems, such an approach was developed in this work, which enables a structured, mission-oriented assessment of aircraft. Based on the mission(s), descriptive capabilities are used together with criteria to determine a system performance potential for mission fulfillment. The composition of the result is prepared transparently for the decision maker and the evaluation and decision process is objectified and reproducible.

The underlying methodology consists of a *macro concept* – which provides the framework for the support system to derive a selection decision – and a *micro concept* – which serves as a database for the evaluation process and contains the necessary expert knowledge. In this work, the methodology is illustrated using the example of military aircraft comparisons and procurements.

This methodology has been implemented as a prototype and contains A-priori expert knowledge (e.g. metrics, weightings and preference functions), which has been developed in selected areas with experts (pilots, system specialists, decision makers) in the context of knowledge acquisition. This made it possible,

- to carry out mission-oriented system evaluations including an analysis of the evaluation results to support selection decisions and to support the derivation of system requirements (which requirements must an aircraft fulfil in order to be *"dominant"* or *"good enough"*?),

- to perform a direct comparison of aircraft threat analyses, identify strengths and weaknesses and evaluate modifications.

The developed decision support system (*DESFACE*: ***DE**cision **S**upport **F**ramework for **A**ir**C**raft **E**valuation*) was validated in a use case scenario with appropriate decision makers. For this purpose, a reference procedure was implemented and also used by the test persons to process a complex evaluation task and derive a selection decision. A significant improvement for *DESFACE* could be proofed in the structured support of the evaluation process itself as well as in the result analysis for a platform-specific evaluation. Therefore, *DESFACE* is a useful approach that supports a mission-oriented, transparent, comprehensible, robust and objective assessment of aircraft. Furthermore, it could be shown that both the structure of the evaluation process as well as the traceability of the evaluation results and thus the degree of confidence in the results could be significantly increased. As a result, the decision makers expressed a clear desire to use this methodology to support current and future selection decisions.

In summary, a decision support system for the derivation of a mission-oriented, holistic, structured and comprehensible selection decision of air-supported systems was conceived in this work, which represents a significant improvement to the previous procedure for the execution of a system evaluation and/or derivation of a selection decision.

Abkürzungen

ADSS	*Agile Decision Support System*
AHP	*Analytical Hierarchy Process*
ALFUS	*Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework*
AOF	*Aggregate Objective Function*
AV	Abhängige Variablen
AWE	Auswahlentscheidung
BM	Berechnungsmodul
CCT	*Combat Cycle Time*
CDF	*Costumer/Constructual Definition Freeze*
CP	*Compromise Programming*
CPACS	*Common Parametric Aircraft Configuration Standard*
CPM	*Customer Product Management*
CV	*Corner Velocity*
DSS	*Decision Support System*
DESFACE	*Decision Support Framework for Aircraft Evaluation*
GAIA	*Geometrical Analysis for Interactive Assistance*
GSD	*Ground Sample Distance*
ECR	*Engineering Change Request*
EK	Elementare Kriterien
ET	Entscheidungsträger
ET-Methode	Entscheidungstheoretische Methode
FAHP	*Fuzzy Analytical Hierarchy Process*
FOV	*Field of View*
HoQ	*House of Quality*
HoM	*House of Metrics*
ISBA	*Iterative Search Binary Algorithm*
ITR	*Instantaneous Turn Rate*
Lfz	Luftfahrzeug
LHS	*Latin Hypercube Sampling*
LOI	*Letter of Intent*
MADM	*Multi-Attribute Decision Making*
MALE	*Medium Altitude Large Endurance*
MCDA	*Multi Criteria Decision Analysis*
MCDM	*Multi Criteria Decision Making*
MCS	*Monte Carlo Simulation*
MD	*Miss Distance*
MODM	*Multi Objective Decision Making*
MoU	*Memorandum of Understanding*
NBI	*Normal Boundary Intersection*
NC	*Normal Constraint*
NCAP	*Non-Contextual Autonomy Potential*
NWA	Nutzwertanalyse

OR	*Operations Research*
PCA	*Principal Component Analysis*
PD	Pulse Doppler
PP	*Physical Programming*
QFD	*Quality Function Deployment*
RCS	*Radar Cross Section*
RFC	*Request for Change*
RFI	*Request for Information*
RFP	*Request for Proposal*
RV	Referenzvorgehen
SA	Sensitivitätsanalyse
SAW	*Simple Additive Weighting*
SAR	*Specific Air Range*
SEP	*Specific Excessive Power*
SME	*Subject Matter Expert*
STR	*Sustained Turn Rate*
TIES	*Technology Identification, Evaluation and Selection*
TIF	*Technology Impact Forecasting*
TR	*Turn Radius*
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*
UV	Unabhängige Variablen
VIP	*Virtual Integration Platform*
VP	Versuchsperson
WSM	*Weighted Sum* Methode
WSSM	*Weighted Square Sum* Methode

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG 1

1.1 Zielsetzung 5
1.2 Aufbau der Arbeit 6

2. PROBLEMSTELLUNG 9

2.1 Auswahlentscheidungen von Luftfahrzeugen 11
2.1.1 Einordnung und Abgrenzung 11
2.1.2 Relevanz und Charakteristika von Auswahlentscheidungen 18
2.2 Probleme des Menschen bei der Durchführung von Auswahlentscheidungen 26
2.2.1 Schwierigkeit richtigen Entscheidens 26
2.2.2 Nutzung von Intuition und Heuristiken 27
2.2.3 Subjektivität in Entscheidungsproblemen 28
2.2.4 Vertrauensgrad in eine Bewertung 29
2.3 Entscheidungsunterstützungssysteme 30
2.3.1 Anwendungsprobleme bei entscheidungsunterstützenden Verfahren 31
2.3.2 Konzeptionelle Anforderungen an ein Unterstützungssystem 32

3. AKTUELLER STAND DER BEWERTUNGSVERFAHREN FÜR LUFTFAHRZEUGE 37

3.1 Ansätze zur Bewertung von Luftfahrzeugen 37
3.1.1 Modelle zur Bewertung bemannter Luftfahrzeuge 38
3.1.2 Modelle zur Bewertung von unbemannten fliegenden Plattformen 41
3.1.3 Ansätze für Entscheidungsunterstützungssysteme in der Luftfahrt 43
3.2 Eingesetzte Kompensatorische Verfahren 48
3.3 Ableitung des Forschungsbedarfs 53

4. KONZEPT UND METHODENFINDUNG 55

4.1 Generischer Rahmen: *Makro-Konzept* 55
4.2 Metric Derivation Process: *Mikro-Konzept* 56
4.2.1 Bestimmung deskriptiver Kriterien 57
4.2.2 Gewichtung und Skalierung 66
4.2.3 Strukturierung der Datenbasis 72
4.3 Task Criteria Evaluation Process 85
4.3.1 Pareto Optimalität 86
4.3.2 Kompensatorische MCDA- Verfahren 91
4.3.3 Sensitivitätsanalyse 100
4.3.4 Hauptkomponentenanalyse 103
4.4 Zusammenfassung 107

5. UMSETZUNG DES ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNGSSYSTEMS *DESFACE* 109

5.1 Struktur von *DESFACE* 109
5.2 Implementierung der Datenbasis 112
5.2.1 Block Struktur 113
5.2.2 Struktur innerhalb des Fähigkeitsblocks 114
5.2.3 Auswahl der Mission und Anpassen der Kriterienstruktur 116
5.2.4 Bestimmung der Gewichtung 117
5.2.5 Wertfunktionen 120
5.2.6 *House of Metrics*: Aufbau der Datenbasis 121
5.3 Ermittlung der Kriterienausprägungen 123
5.3.1 Berechnungsmodule für unkorrelierte Kriterienausprägungen 123
5.3.2 Berechnungsmodule für korrelierte Kriterienausprägungen: Pareto Fronten 134
5.4 Ergebnisanalyse 136
5.4.1 Berechnung des Systempotentials 136
5.4.2 Sensitivitätsanalysen 141
5.4.3 Optimierung der Systemparameter 144
5.5 Zusammenfassung 147

6. EVALUIERUNG 149

6.1 Evaluierungskonzept 149
6.1.1 Evaluierungsmethode 150
6.1.2 Hypothesen 151
6.2 Verifikation 152
6.2.1 Datensätze der Alternativen 152
6.2.2 Berechnungsmodule für die Kriterienausprägungen 154
6.2.3 MCDA- Methoden 156
6.3 Validierung 159
6.3.1 Versuchsplanung 160
6.3.2 Versuchsdurchführung 169
6.3.3 Experimentelle Ergebnisse 170
6.4 Zusammenfassung der Evaluierung 183

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 185

7.1 Technisch-wissenschaftliche Beiträge 186
7.2 Ausblick 187

8. LITERATUR 189

9. ANHANG 215

1. Einführung

– Entscheiden erfordert vorausgehendes Bewerten –
(Breiing und Knosala 1997)

Die Entscheidungsfindung umfasst jeden Bereich des täglichen Lebens: Menschen treffen kontinuierlich eine Vielzahl unterschiedlicher Entscheidungen[2]. Die Meisten davon sind trivial und auf die Präferenz des Entscheidungsträgers (ET) ausgerichtet, während andere Entscheidungen hochkomplexe Problemstellungen darstellen (Eisenführ et al. 2010). In diesem Zusammenhang wird der Begriff „*Entscheidung*" vor allem dann angewendet, wenn ein Auswahlproblem inklusive Präferenzen des ET von besonderer Bedeutung vorliegt und dessen getroffene Entscheidung eine große Tragweite hat (Laux et al. 2014). Die Wahl einer bestimmten Lösung ist meist irreversibel, so dass mit jeder Entscheidung eine gewisse Verantwortung einhergeht. Dies ist vor allem dann der Fall, „*wenn eine Fehlentscheidung zu technischem Versagen, zu privat-, betriebs- oder volkswirtschaftlichen Verlusten oder gar zu Verlusten der menschlichen Gesundheit führen würde oder wenn das Risiko lokaler oder globaler ökologischer Schäden bis hin zu Katastrophen bestünde*" (Breiing und Knosala 1997). Oft wird allerdings gerade bei solchen Entscheidungen ein geringes Maß an systematischer Analyse beobachtet (Eisenführ et al. 2010). Während intuitive Entscheidungen innerhalb des privaten Verantwortungsbereiches zwar unzureichend aber zumindest legitim sind, müssen Entscheidungen im öffentlichen Bereich von der entscheidenden Instanz verantwortbar und damit verständlich aufbereitet sein. Dabei ist die größtmögliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit die Voraussetzung für die Rechtfertigung und damit für eine verantwortbare Entscheidung (Beisswenger 2016). Daher sollten alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden, um die Zusammenhänge anschaulich und nachvollziehbar darzustellen sowie die Auswirkungen und die Tragweite der Entscheidung in Form einer abschätzbaren oder besser berechenbaren Lösung vorauszubestimmen (Breiing und Knosala 1997).

Eine Entscheidung kann nur dann zu einem Erfolg führen, wenn sich alle Beteiligten der Randbedingungen und der möglichen, oftmals erst langfristig einstellenden Folgen bewusst werden und aus diesem

[2] Eine Entscheidung ist ein mentaler Prozess, dessen zentrale Komponenten Beurteilung, Bewertung und Auswahl sind. (Pfister et al. 2017)

Bewusstsein heraus bereit sind, Verantwortung[3] zu tragen. Diese kann von den ET jedoch nur übernommen werden, wenn Klarheit über die Zusammenhänge zwischen Entscheidungsgrundlagen, Entscheidungsabläufen und vor allem deren Folgen und Risiken bzw. Chancen herrscht. Dabei hat der Mensch vor allem dann Schwierigkeiten mit solch komplexen Entscheidungssituationen, wenn sich die Folgen unterschiedlicher Handlungen in mehreren Dimensionen[4] unterscheiden (Eisenführ et al. 2010). Mit anhaltendem Fortschritt[5] nimmt die Überschaubarkeit der politischen, technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge ab, während der Umfang der damit verbundenen Entscheidungsprozesse stetig steigt und damit nicht mehr intuitiv bewältigt werden kann (Breiing und Knosala 1997). Die Bandbreite derartiger Situationen erstreckt sich von der Beschaffung oder Entwicklung technischer Produkte bzw. Systeme bis hin zu regionalen und globalen soziologischen und ökonomischen Aufgaben. Nach (Breiing und Knosala 1997) sind neben den kulturellen und ökologischen Entscheidungen die technischen Entscheidungen und dabei besonders diejenigen, die *„vor und während der Entwicklung und/oder Beschaffung technischer Neuerungen stehen, in ganz besonderem Maße wichtig.“* Als Beispiel solcher Entscheidungen sind die Auswahlentscheidungen technischer Systeme in der zivilen und militärischen Luftfahrt zu nennen. Diese ist weitreichend und multidisziplinär durch die Abdeckung einer großen Bandbreite an verschiedenen Produkten, Disziplinen und Domänen, nicht nur in der Systementwicklung, sondern auch in unterschiedlichen unterstützenden Tätigkeiten wie der Systembewertung (Rossow et al. 2014).

Während das Lösen eines mathematischen Problems durch dessen Gleichung vorgegeben und damit objektiv ist, treten während des Beschaffungs- bzw. Entwurfsprozesses eines Luftfahrzeuges eine große Anzahl an subjektiven Einflüssen und Präferenzen auf, welche selten zu einer einzigen korrekten Lösung führen. Der klassische Beschaffungsprozess eines Luftfahrzeuges besteht dabei auf oberster Ebene aus zwei Phasen: (1) das Finden potentieller Lösungen und (2) die Auswahl einer dieser Lösungen.

Die erste Aktivität beschreibt das Design bzw. die Marktsichtung unterschiedlicher Konzepte zur Erfüllung der an das System gestellten Anforderungen. Die zweite Aktivität beschreibt einen klassischen Entscheidungs- bzw. Auswahlprozess, welcher eine entscheidende Rolle während der Beschaffung eines Luftfahrzeuges einnimmt (Sun 2012). So werden u.a. bei der Marktsichtung, der Ableitung von Anforderungen (*Requirements*) bspw. durch eine Bedrohungsanalyse[6] oder der schlussendlichen Konzeptauswahl

---

[3] (Breiing und Knosala 1997) fordern, das Vorhandensein von Entscheidungskompetenz des ET zu prüfen. Diese Überprüfung wird umso dringlicher, je negativer die Folgen bzw. je größer die möglichen Risiken aufgrund einer falschen Entscheidung sein können.

[4] Die Dimension beschreibt die Sachdimension, welche sich aus Multiplizität, Diversität und Interdependenz zusammensetzt. *„Eine Entscheidungssituation ist in dem Maße sachlich komplexer, je höher die Multiplizität, also die Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussgrößen ist. Sie ist zudem sachlich komplexer, je ausgeprägter die Interdependenzen der Einflussgrößen untereinander sind. [..] Die Entscheidungssituation ist sachlich komplexer, wenn durch das Phänomen der Diversität verschiedenartigste Einflussgrößen zu berücksichtigen sind.“* (Beisswenger 2016).

[5] Darunter ist der allgemeine Fortschritt (technisch, sozial, ökologisch) im Entwicklungs- bzw. Lernprozess der Menschheit zu verstehen.

[6] Bei der Beschaffung eines Luftüberlegenheitsjägers sind bestehende, potentielle Bedrohungen zu bewerten, um Anforderungen (Spezifikationen) an das zu beschaffende Luftfahrzeug und weiterführend eine Entscheidung für eine Kauf- Anpassungs- oder Neuentwicklung aufgrund einer Systembewertung ableiten zu können.

im Entwurfsprozess unterschiedliche Entwürfe bzw. marktverfügbare Luftfahrzeuge betrachtet, bewertet und verglichen, um daraus eine Auswahlentscheidung zugunsten einer besten Lösung abzuleiten[7]. Damit stellt nach (Sun 2012) der Beschaffungs- bzw. Entwurfsprozess allgemein einen Prozess von Auswahlentscheidungen dar. Ebensolche Auswahlentscheidungen zwischen luftgestützten Systemen[8] werden in dieser Arbeit betrachtet, so dass im weiteren Verlauf der Arbeit der allgemeine Terminus „*Entscheidung*" synonym für eine Auswahlentscheidung zwischen Luftfahrzeugen sowohl im Entwurfs- als auch im Beschaffungsprozess verwendet wird. Die Umsetzung der zugrundeliegenden Methodik wird dabei am Beispiel militärischer Luftfahrzeugvergleiche verdeutlicht.

Allgemein werden modernde Kampfflugzeuge und unbemannte fliegende Plattformen zur Erfüllung von Luft- Luft-, Luft- Boden- und Aufklärungs- bzw. Überwachungs- und Transportmissionen konzipiert und eingesetzt (Rossow et al. 2014). Da die erfolgreiche Durchführung dieser Missionen jeweils ganz spezielle Flugzeugeigenschaften erfordert, wäre die größte Wirksamkeit bzw. der größte Nutzen von solch einem Flugzeug zu erwarten, welches speziell für die Erfüllung einer Mission konzipiert und optimiert wurde[9]. Da sich dieses Vorgehen zunehmend aus Kostengründen verbietet, wurden in der Vergangenheit Kampfflugzeuge – welche für eine bestimmte Mission optimiert waren – durch die Integration angepasster Systeme (bspw. Waffen und Avionik) mit der Erfüllung weiterer Missionen betraut (Rossow et al. 2014). Ein Beispiel ist der *F-104 Starfighter*, welcher vom optimierten Luftüberlegenheitsjäger (F-104 G) zum atomwaffenbestückten Allwetter-Jagdbomber umfunktioniert wurde, wofür er allerdings nur mäßig geeignet war[10]. Zur Integration solcher *Multi-Role* Fähigkeiten sind bereits im Entwurf das spätere Nutzungsprofil des Flugzeuges zu berücksichtigen, wobei teilweise erhebliche Kompromisse bei der Befähigung des Systems zur Erfüllung einer speziellen Aufgabe in Kauf genommen werden müssen. Die Forderungen an militärische Flugzeuge gehen inzwischen soweit, dass unterschiedliche Rollen (z.B. Luft-Luft und Luft- Boden) während eines einzigen Einsatzes (*Swing Role*) zu erfüllen sind (Rossow et al. 2014). Forderungen nach guten Flugleistungen im Unter- und Überschallbereich[11] werden gepaart mit Forderungen nach bspw. hoher Überlebensfähigkeit, Aufklärungsleistung, Verfügbarkeit, All-Wetter-

---

[7] Es ist nicht notwendig, in jeder Fähigkeit dem gegnerischen Luftfahrzeug überlegen zu sein. Vielmehr ist relevant, ob die Gesamtfähigkeit bspw. zur Luftüberlegenheit größer ist. Damit gibt es eine Vielzahl von möglichen Anforderungskombinationen, welche durch die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit eingeschränkt werden. Zur Herstellung der Luftüberlegenheit kann es bspw. nützlicher sein, eine verbesserte Missionssensorik (Radar) mit modernen Abstandswaffen und minimierter Radarrückstrahlfläche (*low observable*) zu realisieren, als eine Schubvektorsteuerung mit modifizierter Aerodynamik.

[8] Eine andere Entscheidungsform lässt sich zwischen der Auswahl von Handlungsalternativen finden. Dazu hat die *Federal Aviation Administration* (FAA) den Begriff des *Aeronautical Decision Making* (ADM) als systematischen Ansatz für Piloten zur Ermittlung der besten Handlungsempfehlung definiert. (Harris und Li 2015)

[9] Ein Beispiel ist die SR-71 der amerikanischen Luftwaffe. Dieses System wurde hinsichtlich der „Spionageaufgabe" optimiert und kompromisslos zur optimalen Erfüllung ausschließlich dieser Aufgabe ausgelegt. (siehe https://www.lockheedmartin.com/us/100years/stories/blackbird.html; zuletzt besucht am 02.09.2018)

[10] „*Aus welchem Grund ein Jagdbomber eine Geschwindigkeit von Mach 2,2 leisten soll, ist unbegreiflich. Selbst bei Mach 1,2 kann von einem solchen Flugzeug wohl kaum mehr als einige Zufallstreffer verlangt werden. Tiefangriffsflugzeuge dieser Geschwindigkeitsklasse müssen in ihrer Struktur sehr viel stärker ausgelegt sein, als es die mehr oder wenig konventionell gebaute F-104G ist, und sie benötigen außerdem eine speziell entwickelte Führungs- Elektronik.*" (siehe http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-45125097.html, zuletzt besucht am 10.09.2018)

[11] Im Unterschall werden bspw. ein hoher Maximalauftrieb und ein geringer induzierter Widerstand gefordert, was zu einer hohen Streckung, einer runden Flügelnase (Ausbildung der Saugkraft) und einer moderaten Peilung des Tragflügels führt. Im

Einsatzfähigkeit und geringen Lebensdauerkosten (Whitford 1989). Die Problematik bei diesen Leistungsanforderungen besteht darin, dass diese teilweise gegensätzlich sind und damit widersprüchliche Konsequenzen für die Auslegung haben. Damit ist stets eine Kompromisslösung zu finden, da sich diese einzelnen Spezifikationen für die optimierte Aufgabenerfüllung gegenseitig ausschließen. Während in der Vergangenheit das Design militärischer Luftfahrzeuge vorwiegend an der Erreichung optimaler Flugleistungen ausgerichtet wurde (Kirby 2001), muss in den aktuellen komplexen Einsatzszenarien ein Luftfahrzeug eine Vielzahl unterschiedlichster Anforderungen zumindest eingeschränkt erfüllen und dementsprechend konzipiert sein (Jaiswal 1997). Dabei wird zusätzlich das Fähigkeitsportfolio von Luftfahrzeugen stetig ausgebaut, um Missionen effizienter oder effektiver durchführen zu können.

Den ET interessieren u.a. die *Aufklärungsleistung*, die *Ausdauer*, die *Wirtschaftlichkeit* und die *Anschaffungskosten* des Systems. Im Fall eines nicht dominanten[12] Systems steht der Entscheider im Zielkonflikt, weil jede Alternative Vor- und Nachteile gegenüber den anderen Alternativen besitzt. Dabei kann die Bedeutung von Zielkonflikten für den einzelnen, individuellen Entscheider bereits gewaltig sein; sie ist potentiell noch größer bei Entscheidungen, bei denen eine Vielzahl an Kriterien betrachtet werden (Eisenführ et al. 2010). Damit entwickelt sich die Auswahlentscheidung von luftgestützten Systemen mehr und mehr zu einer hybriden – also viele Disziplinen einschließenden – Problemstellung, deren Komplexität kaum durch einen einzelnen ET erfasst werden kann. Diese Entscheidungsprobleme versetzen den ET in ein „Dilemma“: wo Vorteile sind, da sind auch Nachteile; dadurch sind Entscheidungen mit entsprechenden Abwägungen und schlussendlich einem Kompromiss verbunden. Dabei können unvollständige Systembewertungen zu fehlerhaften Entscheidungen mit weitreichenden Konsequenzen[13] führen (Sun et al. 2014). Beispielsweise können diese Konsequenzen im Bereich der Kosten bei einer Beschaffung bzw. einer Entwicklung enorm sein. So äußerte (Augustine 2005), dass *„in the year 2054, the entire defense budget will purchase just one tactical aircraft. This aircraft will have to be shared by the Air Force and Navy 3½ days each per week except for leap year, when it will be made available to the Marines for the extra day.“* Obwohl dies eher als überzeichneter Aphorismus zu verstehen ist, kann aus Abbildung 1 entnommen werden, dass die Stückkosten eines militärischen Luftfahrzeugs exponentiell steigen, während sich das Budget für eine Beschaffung bzw. Entwicklung nur linear erhöht.

Damit stellt die missionsorientierte Bewertung[14] und weiterführend die Auswahl luftgestützter Systeme eine komplexe und überaus relevante Entscheidungsaufgabe dar, welche auf die begrenzten Fähigkeiten des Menschen zur Behandlung solcher umfangreichen Sachverhalte trifft. Aus diesem Grund ist dieses komplexe Entscheidungsproblem einer systematischen Behandlung zugänglich zu machen (Sun et al.

Überschallbereich hingegen wird die Reduzierung des Nullwiderstandes durch dünne Profile mit großer Pfeilung (und damit niedriger Streckung) und eine geringe bespülte Oberfläche priorisiert.

[12] Ein System ist dann dominant, wenn alle relevanten Eigenschaften eines Systems besser sind als die der Anderen.

[13] Ein Spiegel Artikel beschreibt die „*Starfighter-Affäre*“ und verdeutlicht die Fehlentscheidung für das Waffensystem mit Aussagen wie „*Leider bestehen jedoch begründete Zweifel am praktischen Wert dieses überzüchteten Flugzeuges. Um es vorwegzunehmen: Die unbestrittene Geschwindigkeitsleistung und die Steigfähigkeit dieses Flugzeuges mussten unter schwerwiegenden Kompromissen erkauft werden.“* Die Flug-Revue kommt zu dem Entschluss, dass es sich um *"eine der schwerwiegendsten Fehlentscheidungen"* handele. (http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-45125097.html; zuletzt besucht am 27.06.2018)

[14] wesentliche Aufgabe der Bewertung ist die Entscheidungsvorbereitung (Koch 1996)

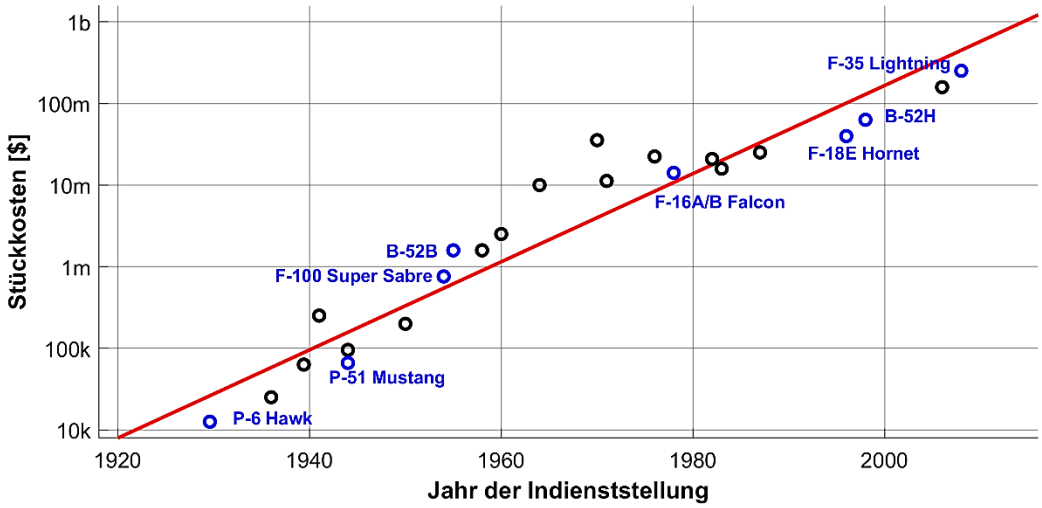


Abbildung 1: Exponentieller Anstieg der Stückkosten eines Luftfahrzeuges (Augustine 2005). *Während das Budget für die Verteidigungsausgaben nur linear steigt, ist ein exponentieller Anstieg der Stückkosten eines Luftfahrzeuges zu verzeichnen (Logarithmische Auftragung der Ordinate).*

2012). Eine wesentliche Folge der rasanten Weiterentwicklung luftgestützter Systeme ist allerdings ein Mangel eben dieser standardisierten und probaten Bewertungsverfahren zur Ableitung einer Auswahlentscheidung (Trentini und Dietrich 2016).

Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der Konzipierung und prototypischen Implementierung eines Entscheidungsunterstützungssystems[15] (*Decision Support Systems*, DSS) für eine ganzheitliche Bewertung (un)bemannter Luftfahrzeuge. Aufgrund der wachsenden Komplexität luftgestützter Systeme (Flager und Haymaker 2009) und der damit verbundenen multidisziplinären Zusammenarbeit unterschiedlicher Experten ist eine ganzheitliche Erfassung der Bewertungsaufgabe für die menschliche Kognition nicht möglich. Damit scheint es angezeigt, einen strukturierten Ansatz zur unterstützten Ableitung einer Auswahlentscheidung zu entwickeln, welcher einen transparenten und nachvollziehbaren Prozess der Systembewertung ermöglicht und damit eine abschließende Auswahlentscheidung unterstützt.

1.1 Zielsetzung

Das in der Einleitung angedeutete Gegenspiel zwischen der steigenden Komplexität von luftgestützten Systemen und der eingeschränkten Fähigkeit des ET zur systematischen Betrachtung einer solchen komplexen Entscheidungsaufgabe führt zu der Notwendigkeit einer methodisch aufbereiteten Systembewertung und –auswahl. Die Arbeit soll aufzeigen, wie ein solcher Bewertungsprozess strukturiert aufbereitet und transparent durchgeführt werden kann. Dabei wird das Grundproblem der Auswahl

[15] Entscheidungsunterstützungssystem (*Decision Support System*, DSS) ist ein Begriff, welcher aus den Forschungen am MIT aus den 1970er Jahren (Keen und Scott Morton 1978) hervorging. Die Definition war sehr weitreichend und beinhaltete die Unterstützung menschlicher Entscheidungsträger durch computergestützte Systeme zur Verarbeitung von Informationen und Ableitung „besserer“ Entscheidungen. (Olson 2008)

unterschiedlicher Luftfahrzeuge oder deren Konfigurationen untersucht. Hierbei handelt es sich um Entscheidungen, die mehrere teilweise in Konflikt stehende Ziele zu erfüllen haben. Neben der reinen Ermittlung des Bewertungsergebnisses und geeigneter Darstellungsformen sind Vorgehen zur Analyse der Robustheit sowie zur Ermittlung von Korrelationen zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien und dem Systempotential zur Missionserfüllung zu realisieren. Weiterhin soll zur Unterstützung des Entwurfsprozesses die Ableitung optimaler Kriterienausprägungen[16] umgesetzt werden, welche als Spezifikation für einen überlegenen Entwurf dienen können. Damit kann die Bewertung gleichzeitig die Formulierung der Anforderungen im Rahmen des *Requirements Engineering* unterstützen. So ergeben sich folgende Anwendungsbereiche (*Use Cases*) des zu entwickelnden Entscheidungsunterstützungssystems (DSS):

- Missionsorientierte, detaillierte und nachvollziehbare Bewertung von Luftfahrzeugen
- Analyse der Ergebnisse (Unsicherheiten, Robustheit, Signifikanz, Korrelationen)
- Ableitung optimaler Ausprägungen zur Unterstützung des *Requirements Engineering*

Besonderes Augenmerk soll auf der Möglichkeit der ganzheitlichen Betrachtung der Systemfähigkeiten und damit auf der transparenten und reproduzierbaren Ermittlung des Bewertungsergebnisses liegen. Es soll ein Prozessmodell entwickelt werden, welches die einzelnen Teilprozesse und deren Methoden bereitstellt. Im Mittelpunkt sollen die methodische Aufbereitung eines DSS sowie dessen prototypische Implementierung stehen. Dazu ist ein multidisziplinärer Ansatz zu entwickeln, welcher die Komplexität einer aktuellen Bewertungsaufgabe abbildet und diese durch ein methodisches Vorgehen strukturieren kann.

1.2 Aufbau der Arbeit

Entsprechend dieser Zielsetzung ist die Arbeit folgendermaßen aufgebaut (vgl. Abbildung 2). Kapitel 2.1 befasst sich mit Auswahlentscheidungen in der Luftfahrt und verdeutlicht deren Relevanz im Beschaffungs- bzw. Entwurfsprozess (Kapitel 2.1.2) und grenzt diese zu anderen Problemstellungen ab (Kapitel 2.1.1). Anschließend wird das Gegenspiel zwischen den Charakteristika solcher Bewertungen bzw. Entscheidungen (Kapitel 2.1.2.3) und den kognitiven Fähigkeiten des menschlichen Entscheiders (Kapitel 2.2) dargestellt. Abschließend werden bestehende Anwenderprobleme von DSS aufgezeigt (Kapitel 2.3.1) und die konzeptionellen Anforderungen an ein DSS abgeleitet (Kapitel 2.3.2).

Ausgehend von diesen Anforderungen wird in Kapitel 3 eine kritische Sichtung der bereits unternommenen Anstrengungen zur Bewertung von Luftfahrzeugen durchgeführt. Dazu werden in Kapitel 3.1 bestehende Bewertungsansätze und Entscheidungsunterstützungssysteme in der Luftfahrt hinsichtlich deren Erfüllung der spezifizierten Anforderungen gesichtet. In Kapitel 3.2 sind die darin genutzten multikriteriellen Entscheidungsmethoden sowie deren bisherigen Anwendungen bei der Bewertung

[16] Ausprägungen beschreiben die Erfüllung von Kriterien. Diese können unterschiedliche Skalenniveaus und Einheiten besitzen. Bspw. haben Kriterien, welche eine Erfüllung adressieren, wahrscheinlichkeitsbasierte Ausprägungen, während monetäre Ausprägungen in einer Geldeinheit angegeben werden.

luftgestützter Systeme Gegenstand der Betrachtung. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Literatursichtung werden in Kapitel 3.3 dazu genutzt, um den Forschungsbedarf abzuleiten.

Kapitel 4 enthält eine ausführliche Darstellung der Methodik des entwickelten Ansatzes zur missionsorientierten Bewertung von Luftfahrzeugen. Das aus den Anforderungen (Kapitel 2.3.2) abgeleitete Konzept besteht aus einem *Makro-Konzept* (Kapitel 4.1) und einem darin integrierten, anwendungsspezifischen *Mikro-Konzept* (Kapitel 4.2). In Letzterem wird eine deskriptive Kriterienstruktur (Kapitel 4.2.3) sowie entscheidungsrelevante Parameter (Kapitel 4.2.3.7) abgeleitet, welche als Datenbasis für den Bewertungsprozess dienen und in Kapitel 4.2.3 methodisch strukturiert werden. In Kapitel 4.3 werden die in dieser Arbeit genutzten Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie ausgewählt und deren Relevanz für die Ergebnisanalyse verdeutlicht. Eine Zusammenfassung des entwickelten Konzeptes in Kapitel 4.4 schließt den konzeptionellen Teil dieser Arbeit ab.

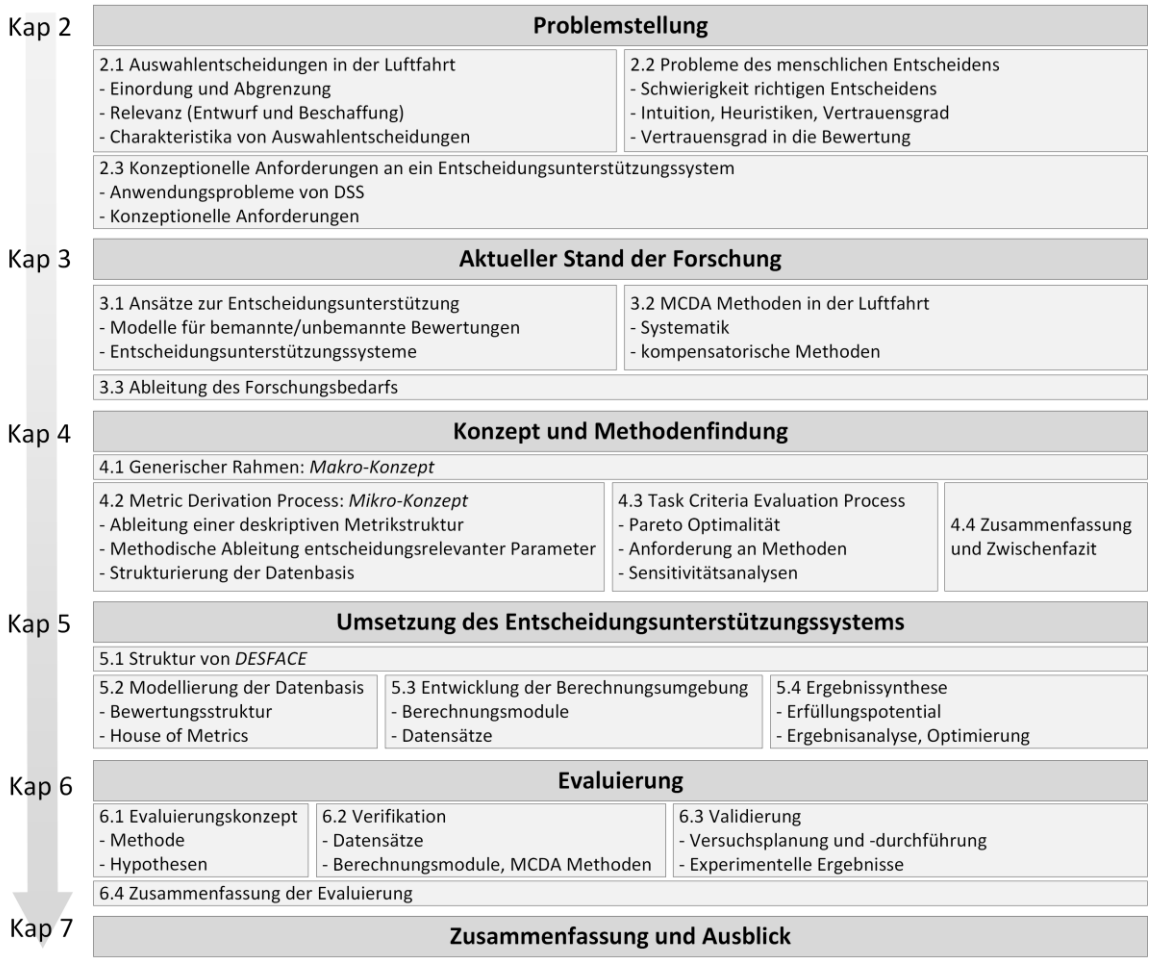


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit. *Die Oberkapitel sind vollständig aufgeführt, während für die entsprechenden Unterkapitel nur Auszüge gelistet sind.*

Auf Basis des vorangegangenen Abschnitts wird in Kapitel 5 die softwaretechnische Umsetzung des entwickelten Konzeptes dargestellt. Dazu wird die Realisierung eines DSS bestehend aus der Struktur des *Makro-Konzeptes* (Kapitel 5.2), der Modellierung und Realisierung der Datenbasis (Kapitel 5.3), der Entwicklung der Berechnungsmodule (Kapitel 5.4) und der Ergebnissynthese (Kapitel 5.4) beschrieben.

Die Evaluierung der entwickelten Methodik wird in Kapitel 6 behandelt. Dazu wird das Evaluierungskonzept in Kapitel 6.1 vorgestellt. Anschließend erfolgt die Verifikation der Datensätze, Berechnungsmodule und MCDA- Methoden in Kapitel 6.2. Die konzeptionelle sowie operationelle Validierung wird in Kapitel 6.3 thematisiert. Nach der Beschreibung der Versuchsplanung und der Versuchsdurchführung werden die experimentellen Ergebnisse der Validierungskampagne erläutert. Eine Zusammenfassung der Validierungsergebnisse in Kapitel 6.4 rundet die Arbeit ab.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen in Kapitel 7.

2. Problemstellung

In diesem Kapitel wird das in der Einleitung angedeutete Gegenspiel zwischen den menschlichen Fähigkeiten zur komplexen Entscheidungsfindung und den Charakteristika der betrachteten Auswahlentscheidung von Luftfahrzeugen behandelt. Dazu soll anfangs der Entscheidungsbereich dieser Arbeit genauer definiert und zu anderen Entscheidungssituationen in der Luftfahrt abgegrenzt werden. Weiterhin wird die Relevanz solcher Auswahlentscheidungen verdeutlicht und deren Charakteristika beschrieben. In Bezug dazu werden die Fähigkeiten des menschlichen Entscheiders mit dessen Schwierigkeiten bei der Entscheidungsfindung behandelt sowie die Anwendungsprobleme von unterstützenden Entscheidungssystemen begründet. Abschließend werden daraus die konzeptionellen Anforderungen an ein zu entwickelndes Bewertungskonzept abgeleitet.

Für den weiteren Sprachgebrauch in dieser Arbeit sollen die Begriffe des *Luftfahrzeuges*, der *Konfigurationen* und *Varianten* definiert werden.

Begriff	**Definition**	**Beispiel**
Luftfahrzeug (Lfz)	Technisches System, welches durch Erzeugung von statischen oder dynamischen Auftrieb sein eigenes Gewicht überwinden kann und zu einer fliegenden Plattform wird.	Flugzeug, Hubschrauber, Ballon
Typ	Charakteristische Bauart eines Lfz für einen bestimmten Einsatzzweck	Passagiermaschine, Militärjet, UAV
Varianten/ Muster	Bau- oder Modellreihen von Luftfahrzeugtypen, welche sich durch ihren Einsatzzweck und/oder ihre Fähigkeiten unterscheiden	Heron, Predator, Global Hawk
Konfiguration[17]	Ausprägung eines Musters mit unterschiedlichen Fähigkeiten (z.B. durch Ausstattungsunterschiede)	Unterschiedliche Missionssensorik oder Bewaffnung

Im Folgenden soll der Begriff *Luftfahrzeug* alle unteren Stufen der Taxonomie einschließen, so dass eine Auswahlentscheidung zwischen Luftfahrzeugen ebenso auch zwischen einzelnen *Konfigurationen* oder *Varianten* eines Lfz getroffen werden kann. Für die folgenden Ausführungen soll sich auf militärische Luftfahrzeuge beschränkt werden, so dass sich alle aufgeführten Beispiele und Anwendungen auf diese

[17] Konfigurationen können auch unterschiedliche Bauarten/Anordnung von Tragflügeln (Delta) oder der Status von Subsystemen (Lande- bzw. Reiseflugkonfiguration bei Klappen) sein. (Klußmann und Malik 2007)

Domäne beziehen. Gleichwohl sind die entwickelten Vorgehen und Ansätze dieser Arbeit auch auf zivile Lfz anwendbar bzw. übertragbar.

Weiterhin sollen kurz die wichtigsten entscheidungstheoretischen Grundbegriffe für die Bewertung von Luftfahrzeugen definiert werden. Die Definitionen sind dabei weitestgehend aus (Laux et al. 2014) entnommen.

Nutzenabsicht — Unterschiedliche Luftfahrzeuge werden hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Erfüllung einer geforderten Aufgabe bewertet und miteinander verglichen. Diese Aufgabe kann die Erfüllung einer oder mehrerer Mission(en) sein. Das Konglomerat aus zu erfüllenden Missionen wird im Folgenden als *Nutzenabsicht* bezeichnet.

Alternativen — Die betrachteten Konfigurationen oder Luftfahrzeuge werden als *Alternativen* bezeichnet. In dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass die Alternativen (Luftfahrzeuge) bekannt sind und ausschließlich eine Menge an abzählbaren Alternativen (diskreter Lösungsraum) betrachtet wird.

Zielsystem — Um einzelne Luftfahrzeuge (Alternativen) bewerten zu können, müssen diese in Bezug auf die Nutzenabsicht konkretisiert werden. Als Grundlage dient ein *Zielsystem*, welches alle für die Bewertung relevanten Ziele enthält (Optimierungskriterium). Mit Bezug auf die optimale Ausprägung (s.u.) einer Eigenschaft kann damit ein Ziel formuliert werden (Maximierungs- oder Minimierungsvorschrift). Das Zielsystem kann sehr einfacher Natur, jedoch bei mehreren Zielgrößen und Zielkonflikt wesentlich komplexer sein.

Kriterien — Luftfahrzeuge besitzen charakterisierende Merkmale bzw. Eigenschaften, mit denen sie sich von anderen unterscheiden. Diese werden zu *Bewertungskriterien*, wenn sie eine Relevanz für das Bewertungsvorhaben besitzen. Damit sind alle *Kriterien* Merkmale, allerdings sind nicht alle Merkmale *Kriterien*.

Ausprägungen — Die betrachteten Kriterien weisen Intensitäten *(Ausprägungen)* auf, die auf einem entsprechenden Skalenniveau angegeben werden können.

Gewichtung — Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Wichtigkeiten einzelner Kriterien zur Erfüllung der Nutzenabsicht werden *Gewichtungen* formuliert. Diese repräsentieren die Bedeutsamkeit des jeweiligen Kriteriums für das Gesamtproblem.

Präferenzen — Um die Neigung des Entscheidungsträgers (ET) hinsichtlich der zur Wahl stehenden Alternativen oder der Ausprägungen von Kriterien auszudrücken, werden *Präferenzen* formuliert. *„Sie repräsentieren die positive oder negative Einstellung des ET gegenüber den Konsequenzen, die mit den Alternativen auf Basis der gestellten Ziele einhergehen“* (Geldermann 2014).

Wertvorstellung — Die Kombination aus Gewichtung und Präferenzen wird als Wertvorstellungen bezeichnet

2.1 Auswahlentscheidungen von Luftfahrzeugen

In diesem Kapitel wird die Relevanz von Auswahlentscheidungen zwischen unterschiedlichen Konfigurationen oder Varianten hervorgehoben sowie deren Charakteristika und Herausforderungen erläutert. Weiterführend wird eine Abgrenzung der betrachteten Problemstellung vorgenommen.

2.1.1 Einordnung und Abgrenzung

Bevor Besatzungen mehr oder weniger umfangreiche und zeitkritische Auswahlentscheidungen im Cockpit treffen, sind Ingenieure mit einer Vielzahl komplexer Entscheidungen im Rahmen des Beschaffungs- bzw. Entwurfsprozesses konfrontiert. Diesen Entscheidungen gehen strategische Ausrichtungen im zivilen und militärischen Bereich voraus, welche unter anderem die Beschaffung von Luftfahrzeugflotten oder die Zusammensetzung unterschiedlicher Entitäten im Wirk- bzw. Aufklärungsverbund adressieren. Es zeigt sich, dass sich die Auswahlentscheidungen in deren Umfang und Auswirkung stark unterscheiden und anhand einzelner Charakteristika klassifiziert werden können. Deshalb soll in diesem Kapitel die für diese Arbeit relevante und betrachtete Entscheidungssituation herausgestellt und eine Abgrenzung bzw. Einordnung vorgenommen werden.

2.1.1.1 Unterschiedliche Entscheidungssituationen

Es gibt unterschiedliche Klassifizierungsmerkmale für Entscheidungsvorgänge, wie bspw. der Informationsstand (Bamberg et al. 2012), die Anzahl der Zielsetzungen (mono/multikriteriell) (Dinkelbach 1982), die zeitliche Interdependenz zwischen den Entscheidungen (statistisch/dynamisch) (Laux et al. 2014) oder die Anzahl der beteiligten ET (Bamberg et al. 2012). Eine Kombination dieser Merkmale kann in der Vier- Felder- Matrix nach (Beisswenger 2016) gefunden werden, welche im Weiteren zur Differenzierung dienen soll. In den vier Feldern (siehe Abbildung 3) lassen sich unterschiedliche Entscheidungssituationen finden, bei denen sich nach der Nummerierung der Felder die Komplexität erhöht (Pfeilrichtung in Abbildung 3).

Im I. Feld sind Entscheidungen mit geringer Komplexität, Dynamik und Tragweite zu finden. Diese *Normalen Entscheidungssituationen* wiederholen sich mit ähnlichen Rahmenbedingungen, wodurch meist die Erfahrung des ET die Grundlage dieser Entscheidungen bildet. Auf eine aufwändige Informationsbeschaffung wird aufgrund der geringen Relevanz verzichtet und die Entscheidungen können in Echtzeit durch Intuition oder Heuristiken getroffen werden.

Entscheidungen im II. Feld sind mit einer extrem hohen Dynamik gekoppelt. Daher besteht nicht ausreichend Zeit für eine systematische Entscheidungsfindung. Die genannten Charakteristiken führen zu der Bezeichnung einer *Chaotischen Entscheidungssituation.* Vor einer solchen Entscheidung stehen bspw. Piloten in einer Luftnotlage[18]. In solchen hochdynamischen Situation können Assistenzsysteme den Piloten

[18] Für diese Art der Entscheidungen wurde durch die NASA die *FORDEC* Methode entwickelt. Sie soll Piloten und andere Verantwortliche in schwierigen Situationen unterstützen, um zu einer guten (rationalen) Entscheidung zu kommen.

bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Diese Problemstellung des *Crew Ressource Management* (Salas et al. 2016) und speziell *„die menschengerechte Automatisierung von Arbeitsprozessen in der Flugführung"* (Schulte 2013) sind ein weiterer Forschungsschwerpunkt am Institut für Flugsysteme (Onken und Schulte 2012)[19], sollen allerdings in dieser Arbeit nicht adressiert werden.

Im IV. Feld sind hochkomplexe Entscheidungen mit langfristigen Auswirkungen von sehr hoher Bedeutung zu finden. Diese *Strategischen Entscheidungen* sind die komplexeste Art und *„umfassen unter anderem Maßnahmen und Vorgehen im Rahmen der Unternehmenspolitik und Unternehmensstrategie, die langfristig orientiert sind"* (Beisswenger 2016). Die entscheidungsrelevanten Faktoren sind durch eine hohe Interdependenz und Diversität geprägt. Dieser Problemstellung wird vorwiegend im Rahmen des *Operations Research* (OR) unter der Nutzung mathematischer Modelle und Optimierungsrechnungen begegnet.

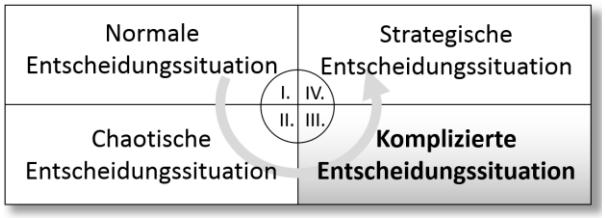


Abbildung 3: Die Vier-Felder-Matrix nach (Beisswenger 2016) zeigt Entscheidungen mit unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten. *Es lassen sich unterschiedliche Grade der Komplexität identifizieren. Diese steigt mit zunehmender Nummerierung in Pfeilrichtung.*

Die *komplizierten Entscheidungen* im III. Feld sind durch einen mittel- bis langfristigen Planungshorizont oder Langzeitauswirkungen mit mittlerer bis hoher Tragweite gekennzeichnet (Beisswenger 2016). Derartige Situationen bedürfen einer aufwändigen Informationsbeschaffung und Spezifizierung des Problems. Für (Kluwe 1995) liegt das charakteristische Merkmal einer komplexen Entscheidung bzw. eines komplexen Problems in der Zahl der miteinander verknüpften Variablen bzw. der notwendig verknüpften Operationen für deren Lösung. Die relevanten Faktoren weisen eine geringe Dynamik auf, so dass die Gültigkeit der Entscheidungen zeitlich nahezu unabhängig ist. Die in dieser Arbeit betrachteten Entscheidungen und Bewertungen können nach der Nomenklatur von (Beisswenger 2016) als *Komplizierte Entscheidungssituation* verstanden werden, welche sich durch eine hohe Komplexität und eine nachvollziehbare Ursache-Wirkung-Beziehung charakterisieren lassen. Im folgenden Kapitel soll die Abgrenzung zwischen den *komplizierten* und *strategischen* Entscheidungssituationen näher erläutert und damit der Betrachtungsbereich der Auswahlentscheidungen in dieser Arbeit genauer definiert werden.

2.1.1.2 Luftfahrzeug vs. Verbund

Die Klassifizierung dieser beiden Entscheidungssituationen aus dem vorherigen Kapitel ist in einer Pyramide in Abbildung 4 hierarchisch dargestellt. Darin steigt die Komplexität zur Spitze der Pyramide hin an. Über die Ebenen ist die Tragweite und der verfügbare Zeithorizont konstant (vgl. Abbildung 3). Dabei

---

Ein Beispiel für eine solche Situation ist die Landung des US-Airways-Flugs 1549 auf dem Hudson River im Jahr 2009. Beide Triebwerke fielen durch einen Vogelschlag aus und der Pilot hatte 3 Minuten Zeit, um einen geeigneten Landeplatz zu finden, welchen er im Gleitflug bei 1000m Höhe über Grund noch erreichen konnte.

[19] Schwerpunkt ist die Entwicklung *„von Automatisierungsansätzen für höhere, kognitive Aufgaben"* (Schulte 2013) bei der Führung mehrerer unbemannter Plattformen aus einem bemannten Cockpit heraus (*Manned-Unmanned Teaming*, MUM-T).

wird die stufenweise Aufteilung durch den Umfang der Systemgrenze beschrieben. Es können drei Kategorien bzw. Ebenen unterschieden werden (Nichols 2005):

Komponentenebene: Diese Ebene beinhaltet die Bewertung von Subsystemen oder technischen Komponenten einer fliegenden Plattform, bspw. eines Missionssensors. Die Bewertung erfolgt ausschließlich für die jeweilige Komponente anhand von Fähigkeiten bzw. Kriterien.

Missionsebene: In der Missionsebene wird hingegen das Zusammenwirken der Plattform mit deren Komponenten zur Erfüllung einer vorgegebenen Nutzenabsicht betrachtet. Diese Ebene ist unterteilt in die plattformspezifische Bewertung eines Systems (1 vs. 1) oder in die Bewertung mehrerer Systeme im Verbund (viele vs. viele)[20]. Für letztere sind sowohl Interaktionen zwischen den Plattformen wie Taktiken oder verteilte Fähigkeiten eines homogenen oder heterogenen[21] Verbunds zu betrachten.

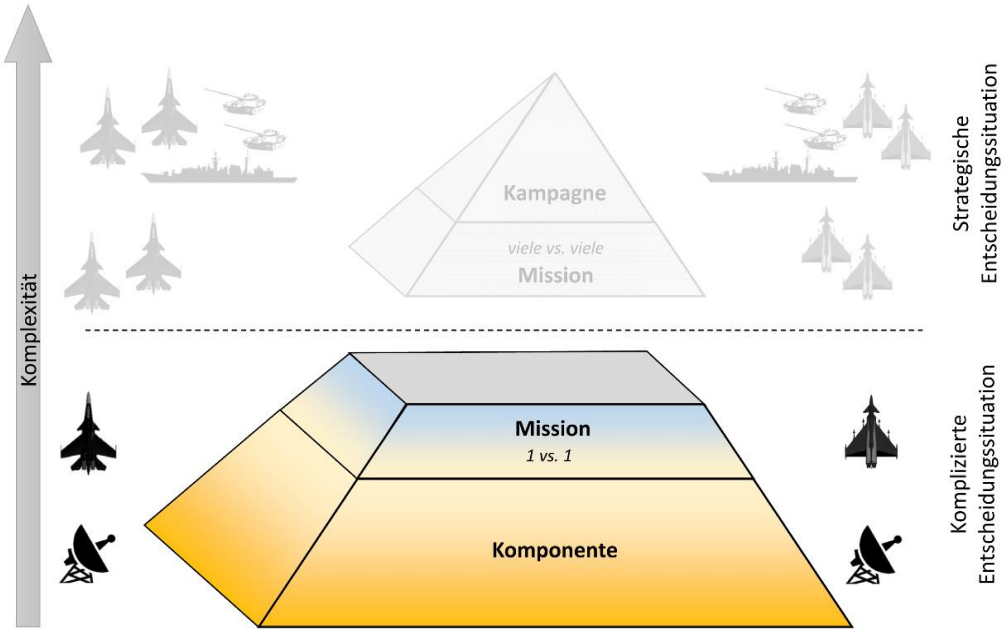


Abbildung 4: Hierarchische Darstellung der Entscheidungsprobleme für die Bewertung von Luftfahrzeugen (mod. nach (Nichols 2005)). *Die Ebene des Entscheidungsproblems ergibt sich aus der betrachteten Systemgrenze, welche direkt mit der Komplexität des Entscheidungsproblems korreliert. Der hervorgehobene Bereich stellt den betrachteten Rahmen der Entscheidungsunterstützung in dieser Arbeit dar.*

Kampagnenebene: In dieser Ebene stehen quantitative Fragestellungen wie bspw. nach der notwendigen Menge der Systeme zur zufriedenstellenden Erfüllung der Nutzenabsicht im Mittelpunkt des Interesses. Es werden u.a. Strategien oder Zusammensetzungen von unterschiedlichen Entitäten (bspw. boden-, luft- und seegestützten Kräften) mit komplexen Simulationen[22] untersucht. Grundlage für die Ermittlung des

[20] Ausgeführte Umgebungen für Gefechtsfeldsimulationen sind bei (Joseph Nalepka 2000) und (Harris und Fricke 1996) zu finden.

[21] homogen: Zusammensetzung aus gleichen Typen/Varianten/Konfigurationen; heterogen: Zusammensetzung aus unterschiedlichen Typen/Varianten/Konfigurationen (siehe Anfang des Kapitels)

[22] Ausgeführte Kampagnenmodelle sind bei (Hillestad und Moore 1996) und (Hillestad et al. 1996) zu finden.

quantitativen Optimums sowie der optimalen Zusammensetzung der Ressourcen innerhalb des Kampagnenmodells und der oberen Missionsebene (viele vs. viele, siehe Abbildung 4) ist der Einsatz mathematischer (Differential- und Integralrechnung) und heuristischer (z.B. Simulationen) Optimierungsmethoden. Diese mathematische Optimierung wird als Kernproblem im Rahmen des *Operations Research* (OR) behandelt (Jaiswal 1997).

***Einordnung in Operations Research*:**

Die Zielsetzung des OR[23] ist die Entwicklung und der Einsatz von mathematischen Modellen und Verfahren zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen (Schwenkert und Stry 2015). Allgemein können dazu zahlreiche verschiedene Verfahren wie bspw. Entscheidungsbaumverfahren, mathematische Optimierungen, Verfahren der Simulation und Modelle der Spieltheorie herangezogen werden.

„Operations Research is concerned with optimal decision making in, and modeling of, deterministic and probabilistic systems that originate from real life. […] The contribution from the operations research approach stems primarily from:
Structuring the real-life situation into a mathematical model, abstracting the essential elements so that a solution relevant to the decision maker's objectives can be sought."

(Shah et al. 2010)

Die Verfahren der mathematischen Optimierung umfassen die beiden oberen Ebenen der Pyramide in Abbildung 4, in denen das Zusammenwirken unterschiedlicher Entitäten mit Taktiken, Strategien und Regeln betrachtet wird. Dabei wird ein reales Problem in ein mathematisches Modell überführt, um eine Problemanalyse und weiterführend eine optimale, quantitative Entscheidung herbeiführen zu können (Corsten et al. 2015). Dieser Bereich soll nicht Teil dieser Arbeit sein und ist daher grau hinterlegt.

Vielmehr soll in dieser Arbeit das System Luftfahrzeug plattformspezifisch betrachtet werden, um dessen Potential zur Erfüllung einer Nutzenabsicht zu ermitteln. Diese missionsorientierte Bewertung findet innerhalb der unteren Missionsebene statt und betrachtet ausschließlich den Vergleich einzelner luftgestützter Systeme untereinander (*one vs. one*). Den methodischen Fundus dazu liefert die multikriterielle Entscheidungstheorie (MCDA, *Multi Criteria Decision Analysis*). (Bana e Costa et al. 1999) stellt fest, dass *„in contrast to the more classical OR approaches, the multicriteria decision aid framework facilitates learning about the problem and the alternative courses of action, by enabling people to think about their values and preferences from several points of view."* Damit stellt die multikriterielle Entscheidungstheorie einen stetig wachsenden Teilbereich des OR zur Behandlung komplexer Entscheidungen dar (Wilkens 2012; Zhaoxu und Min 2010). In dieser Arbeit werden keine quantitativen Aussagen (Anzahl der benötigten Systeme), Planungs- und Koordinierungsfragestellungen sowie Verhaltensvorhersagen

[23] Der Ursprung des Begriffes stammt aus den Zeiten des zweiten Weltkrieges, indem Großbritannien und die USA versucht haben, militärische Entscheidungen mithilfe mathematischer Methoden zu verbessern. (https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/operations-research-or-46854, zuletzt besucht am 02.09.2018)
Zur Schwierigkeiten der Übersetzung des Begriffs siehe (Kulhavy 1963).

getroffen, sondern vielmehr Erfüllungspotentiale verschiedener Alternativen (Luftfahrzeuge) inklusive deren Rangfolgen und optimale Systemparameter (*Requirements Engineering*) ermittelt.

2.1.1.3 Entscheidungstheoretische Einordnung

Die Formulierung und Lösung von Entscheidungsproblemen ist für verschiedene wissenschaftliche Disziplinen zu einem zentralen Thema geworden (Laux et al. 2014). Daraus hat sich unter anderem der interdisziplinäre Forschungsschwerpunkt der Entscheidungstheorie entwickelt, welcher sich allgemein mit dem menschlichen Entscheidungsverhalten und dessen Unterstützung befasst[24].

Zur Beschreibung von Entscheidungsprozessen gibt es eine Vielzahl von Modellen und theoretischen Konzeptionen. Entscheidungstheoretische Probleme wurden erstmals in den Wissenschaftsbereichen der Philosophie, der Ökologie und der Mathematik diskutiert (Pfister et al. 2017), wodurch die Wurzeln der komplexen Entscheidungsprozesse in diesen Bereichen zu finden sind.

- Die *philosophische* Wurzel ist der Utilitarismus[25], wonach eine Handlung nur nach ihren Konsequenzen (moralisch gut und richtig) her zu bewerten ist.
- Die *ökonomische* Wurzel liegt in dem egoistischen Handeln eines Wirtschaftssubjekts (bspw. Privathaushalt, Unternehmen oder Staat) zur Maximierung des eigenen Nutzens.
- Die *mathematische* Wurzel liegt in der Wahrscheinlichkeitstheorie, speziell in der Behandlung von Glücksspielen.

Die Basis für die Behandlung von Entscheidungen unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Wertes und der Unsicherheit der Konsequenzen wurde durch die Verknüpfung von Nutzen- und Wahrscheinlichkeitstheorie geschaffen (Pfister et al. 2017). (Simon 1955) machte auf die Grenzen des menschlichen Entscheidens aufmerksam, welches nur begrenzte kognitive Kapazitäten zur Verfügung hat und damit den Anforderungen eines mathematischen Modells nicht gerecht werden kann. Dies bildete den Ausgangspunkt für die heutige Entscheidungsforschung, welche keiner einzelnen Disziplin zugeordnet werden kann. Sie findet interdisziplinäre Anwendung in der Betriebswirtschaftslehre, Psychologie, Statistik, Politik oder den Ingenieurswissenschaften. Dabei nutzen die einzelnen Disziplinen unterschiedliche Intentionen der Entscheidungsforschung, um zum einen beschreibende oder zum anderen vorschreibende Aussagen zu gewinnen. Dementsprechend werden im Rahmen der Entscheidungstheorie diese beiden grundlegenden Ansätze sowie eine Mischform unterschieden:

1. Die beschreibende *Deskriptive Entscheidungstheorie* enthält Aussagesysteme, die im Rahmen empirischer Untersuchungen ausgearbeitet wurden (Laux et al. 2014). Diese verfolgen das Ziel, das tatsächliche menschliche Entscheidungsverhalten zu reflektieren und Hypothesen über das Verhalten der Individuen zu formulieren. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Fragestellung, wie Individuen in der Realität entscheiden und warum eine Entscheidung einen speziellen Ausgang gefunden hat. Im

[24] Zur Entwicklung der Entscheidungstheorie (vgl. Fishburn 1989)

[25] Ein moralisch richtiges Handeln hat optimale Konsequenzen zur Folge. Ein moralisch gutes Handeln charakterisiert die Nutzenmaximierung für die Allgemeinheit.

Rahmen dieser Forschung haben Psychologen eine Reihe systematischer Fehler aufgedeckt, denen jeder ET unterliegt (bspw. *Hindsight Bias*[26]) und die schlussendlich nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf das Ergebnis der Entscheidung haben können[27].

2. Die *Präskriptive Entscheidungstheorie* befasst sich mit der Entscheidungsunterstützung durch Strategien und Methoden, um möglichst rationale Auswahlentscheidungen treffen zu können, die mit den Zielvorstellungen des ET übereinstimmen. Damit wird nicht eine absolute Richtigkeit angestrebt (welche per se unerreichbar ist), sondern die systematische, nachvollziehbare und fundierte Auswertung der verfügbaren Informationen.
3. Die vorschreibende *Normative Entscheidungstheorie* ist eine spezielle Form der *präskriptiven* Entscheidungstheorie. Im Gegensatz zu dieser sind nicht die Wertvorstellungen des Entscheiders maßgebend, sondern es bildet Expertenwissen die Basis des Entscheidungsvorschlages (Baron 2008). Sie liefert formalisierte Regeln zur Berechnung optimaler Auswahlentscheidungen (Binmore 2011).

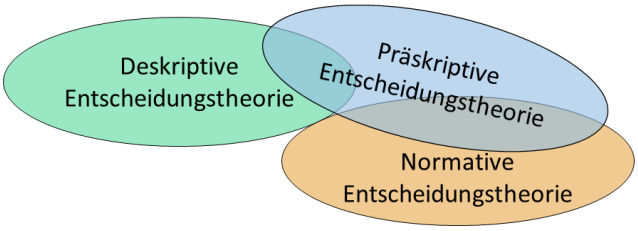


Abbildung 5: Arten der Entscheidungstheorie. *Die Darstellung zeigt den Zusammenhang der drei Arten. Die Präskriptive Entscheidungstheorie wird von den beiden Disziplinen beeinflusst und ergänzt.*

Während die *normative* und *deskriptive* Entscheidungstheorie wenige Überschneidungen aufweisen, finden sich in der *präskriptiven* Entscheidungstheorie Elemente von beiden Disziplinen wieder (Nitzsch 1992). Sie vereint die Deskription („*Wie verlaufen Entscheidungsprozesse?*“) und die Präskription („*Wie sollten Entscheidungsprozesse besser verlaufen?*“) (Pfister et al. 2017). Dabei besitzt die *präskriptive* Theorie allerdings eine deutlich größere Überschneidung mit der *normativen* Theorie, weshalb beide auch als *normativ-präskriptive* Theorie bezeichnet werden (siehe Abbildung 5). Die *deskriptive* Forschung zeigt die Erkenntnisse über die Schwächen des menschlichen Entscheidungsverhaltens in bestimmten Situationen. Die *normative* Entscheidungstheorie stellt hingegen gewisse Regeln und Objektivierungsmaßnahmen zur Verfügung. Zur Unterstützung der vergleichenden Bewertung komplexer technischer Systeme ist eine Auswahl aus mehreren Alternativen zu treffen, welche bei zahlreichen Entscheidungssituationen entstehen. Diese Anwendung in Kombination mit den Schwierigkeiten des Menschen mit solchen neuartigen, nicht routinierten Entscheidungssituationen wird durch die *präskriptive* Theorie adressiert. Generell ist diese für vielfältige Auswahlentscheidungen anwendbar, „*von hochkomplexen wie dem Standort eines Großflughafens bis zu relativ einfachen wie der Auswahl eines Blu-ray-Players*“ (Eisenführ et al. 2010). Aus diesem Grund befasst sich die vorliegende Arbeit mit der *präskriptiven* Entscheidungstheorie, welche formalisierte Regeln und Prozeduren bereitstellt, um dem ET „*seine teilweise unbewussten, unklaren, widersprüchlichen Erwartungen und Wünsche zu formen und transparent zu machen*“ (Eisenführ et al. 2010).

[26] Detailliertere Informationen zum „Rückschaufehler“ sind bspw. bei (Christensen-Szalanski und Willham 1991) aufgeführt.
[27] Eine Übersicht über die deskriptiven Aspekte des Entscheidens sind in (Eisenführ et al. 2010) zu finden.

Dabei gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden und Verfahren der *präskriptiven* Entscheidungstheorie. Verschiedenste Systematisierungen lassen sich bspw. bei (Dinkelbach 1982; Patton et al. 2016) finden. Grundsätzlich werden zwei Kategorien von Bewertungsverfahren unterschieden:

1) Darstellung und Beschreibung von Alternativen

Die Methoden zur *Darstellung und Beschreibung von Alternativen* dienen zur Auflistung der verfügbaren Lösungen für das Entscheidungsproblem. Methodische Vorgehen zur Auswahl der optimalen Alternative werden von diesen Verfahren nicht bereitgestellt. Nach (Müller-Herbers 2007) werden verschiedene Methoden wie *Brainstorming*, *Checklisten*, *Werteprofile*, *Expertenbefragungen* oder Verfahren wie die *Wertbaumanalyse* genutzt. Diese dienen allerdings nicht zur Reduzierung der Komplexität, sondern erzeugen im Gegenteil eine Vielfalt. Sie sollen in dieser Arbeit ausschließlich bei der Ableitung der Kriterien näher betrachtet werden (Kapitel 4.2.1.2), haben allerdings für die Ableitung einer Auswahlentscheidung bzw. Bewertung von Luftfahrzeugen keine Bedeutung.

2) Beurteilung und Auswahl von Alternativen

Diese Methoden beinhalten die Schritte zur Ableitung eines Bewertungsergebnisses bei komplexen Auswahlentscheidungen. Es werden formalisierte Schritte bereitgestellt, um z.B. das Anspruchsniveau, die Erfüllungsgrade oder Potentiale eines technischen Systems zu ermitteln und damit die betrachteten Alternativen in eine Rangfolge zu überführen. Dazu wird ein Zielsystem genutzt, für dessen Ableitung allerdings keine Vorgaben gemacht und damit von der Methode selbst keine Unterstützung beigestellt wird. In Abbildung 6 ist ein Überblick der beschriebenen Strukturierung dargestellt.

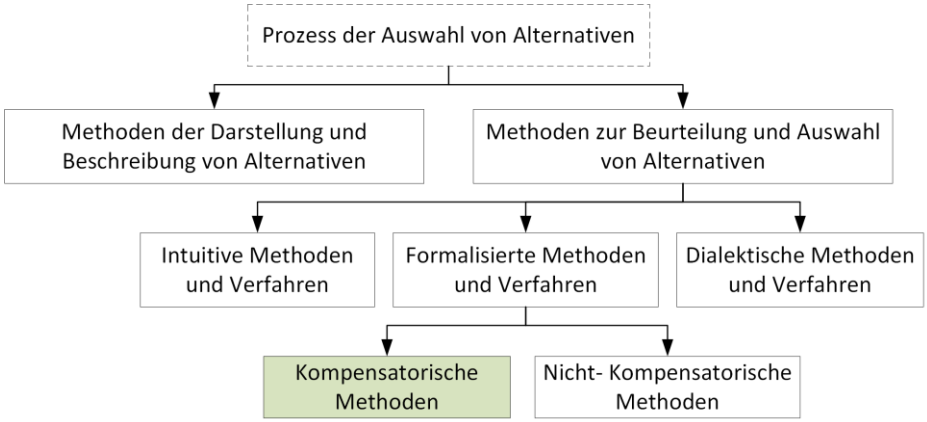


Abbildung 6: Schemata zur Strukturierung der Methodenvielfalt (nach (Müller-Herbers 2007)). *Der hervorgehobene Bereich der kompensatorischen Methoden wird in dieser Arbeit thematisiert. Die Methoden aus den anderen Bereichen sollen aufgrund ihrer geringen Relevanz nicht näher betrachtet werden.*

Bei den *intuitiven* Methoden wird davon ausgegangen, dass die Bewertung der betrachteten Alternativen mit Hilfe eines Gesamteindrucks erfolgen kann. Dabei handelt der ET spontan und verlässt sich auf seine Intuition und Heuristiken (Kapitel 2.2.2), was bei komplexen Entscheidungsproblemen zu keinem belastbaren Ergebnis führt (Eisenführ et al. 2010). Die *dialektischen* Methoden basieren auf der mündlichen argumentativen Behandlung von Alternativen, d.h. es werden Vor- und Nachteile von Alternativen aufgeführt und im Sinne von These und Antithese betrachtet (Müller-Herbers 2007). Dabei kommen

kreative Methoden wie bspw. die *Pro-Contra* Methode zum Einsatz. Da sich die in dieser Arbeit betrachtete Bewertungsaufgabe nicht auf solche argumentativen Abwägungen stützen kann, werden die *dialektischen* wie auch die *intuitiven* Vorgehen nicht weiter berücksichtigt.

Dem gegenüber stehen die *formalisierten* Verfahren, welche klare Schritte zur Entscheidungsfindung vorgeben und damit zur Bewältigung und Reduktion der Komplexität als auch zur Steigerung der Nachvollziehbarkeit des Prozesses dienen. Da es sich bei der Bewertung technischer Systeme um ein komplexes Entscheidungsproblem handelt, sind multikriterielle Methoden zur Unterstützung der ET anzuwenden. Diese ermöglichen die simultane Berücksichtigung von teilweise konfliktären Kriterien, die sowohl quantitativer als auch qualitativer Natur sein können (Oberschmidt et al. 2009). Ist dem ET nur ein Ziel wichtig (bspw. Minimierung der Kosten), wird von einer monokriteriellen Problemstellung gesprochen, welche meist trivial ist und ohne Unterstützungssysteme behandelt werden kann. In der Realität überwiegen jedoch die multikriteriellen Entscheidungsprobleme, bei denen mehrere Ziele mit teilweise konfliktären Beziehungen (Zielkonflikt) gleichzeitig zu betrachten sind (Zimmermann und Gutsche 1991).

Im Folgenden sollen ausschließlich solche *formalisierten* Entscheidungsverfahren mit Mehrfachzielsetzung betrachtet werden, welche aus einer vorgegebenen Menge an luftgestützten Systemen eine optimale Lösung ableiten (Auswahlentscheidung). Dazu lassen sich *kompensatorische* und *nicht-kompensatorische* Methoden unterscheiden. Letztere sind als „Bewertungsfilter“ zu verstehen, welche die Anzahl der Alternativen soweit reduziert, bis eine bzw. die optimale (relativ günstigste) Alternative ermittelt ist (bspw. *Lexikographische Ordnung*). Dieses Schema des Filterns wird hauptsächlich auf die Ratsamkeit von Handlungen bei Planungs- und Lösungsempfehlungen angewandt, bei denen Ausschlusskriterien zum Verwerfen einer Handlung führen (Edwards et al. 2007). Voraussetzung für die Anwendung dieser Verfahren ist, dass keine Wechselwirkungen zwischen den Kriterien bestehen und sich für jedes Kriterium ein Grenzwert bilden lässt (Patton et al. 2016). Da beide Bedingungen für die Bewertung von Luftfahrzeugen nicht erfüllt sind, kann die Anwendung dieser Gruppe von Methoden ausgeschlossen werden.

Nach (Keeney und Raiffa 1994) sieht die *präskriptive* Entscheidungsforschung (Entscheidungsanalyse) ihre Aufgabe darin, Menschen bei schwierigen und komplizierten Entscheidungsaufgaben zu unterstützten. Die Perspektive dieser Arbeit fokussiert sich daher auf die *präskriptive* Entscheidungstheorie, indem eine methodische Ableitung eines optimalen Entscheidungsergebnisses angestrebt wird. Dabei bleibt die Beschreibung des menschlichen Entscheidungsverhaltens (*deskriptive* Entscheidungstheorie) – soweit dieses nicht für das Untersuchungsziel dieser Arbeit von direkter Bedeutung ist – ohne nähere Berücksichtigung. Der Einsatz der unterschiedlichen *kompensatorischen* Methoden der multikriteriellen *präskriptiven* Entscheidungstheorie wird in Kapitel 3.2 und deren dedizierte Eignung zur Bearbeitung der Problemstellung dieser Arbeit in Kapitel 4.3.2 noch genauer behandelt.

2.1.2 Relevanz und Charakteristika von Auswahlentscheidungen

Überall dort, wo im Verlauf der Beschaffung, der konstruktiven Erweiterung, Änderung, Anpassung oder Entwicklung technischer Systeme Entscheidungen bzgl. einer besten Lösungsalternative getroffen werden müssen, ist zur Verringerung des Risikos einer Fehlentscheidung eine Systembewertung durchzuführen

(Breiing und Knosala 1997). Dabei soll im Folgenden zwischen *Beschaffung* und *Entwicklung* unterschieden werden. Unter *Beschaffung* werden in der Literatur zumeist die operativen Aktivitäten der Materialwirtschaft verstanden (Franken 1984), um einen bestimmten Bedarf zu decken. So soll für die Auswahl eines Luftfahrzeuges zur Erfüllung einer bestimmten Mission und damit zur Deckung des Bedarfes der Stakeholder (Fluggesellschaft, Bundeswehr) an dem Begriff der *Beschaffung* festgehalten werden. Ein *Entwurfsprozess* ist nach (Seeger 2005) ein varietätserzeugender Gestaltungsprozess, dem eine varietätsreduzierende Bewertung folgt. In beiden Prozessen sind Auswahlentscheidungen durchzuführen, was im Folgenden verdeutlicht werden soll.

2.1.2.1 Entwurfsprozess

Im modernen Flugzeugentwurf muss dem steigenden Wunsch nach gleichzeitiger Kostensenkung und Wirtschaftlichkeits- sowie Leistungssteigerung begegnet werden. Die ET stehen dabei vor der Herausforderung, die vielfältigen und potenziell widersprüchlichen Kriterien in Kombination mit einer großen Anzahl an Kundenforderungen in passende Systemanforderungen (*Requirements*) zu überführen. Durch die gleichzeitige Betrachtung bzw. geforderte Erfüllung widersprüchlicher Anforderungen ist der wesentlichste Bestandteil des Entscheidungsprozesses die Suche nach dem besten Kompromiss *(Trade-Off)*. Daher ist der Entwurfsprozess eines Luftfahrzeuges ein Prozess von Entscheidungsfindungen (Sun 2012; Yongchang Li 2007). Dabei geht eine Systembewertung einer abgeleiteten Auswahlentscheidung voraus (Koch 1996). Durch die begrenzten Ressourcen ist speziell im Entwurfsprozess eine prospektive einer retrospektiven Betrachtung vorzuziehen. In Abbildung 7 sind die fortlaufenden Kosten in einem Entwurfsprozess aufgetragen. Die finanziellen Kosten für eine Designänderung (*Engineering Change Request*, ECR) steigen mit zunehmenden Designfortschritt, während die Entwurfsfreiheit und damit die Anzahl potentieller Designlösungen anfangs hoch ist und sich später reduziert. Dies verdeutlicht die Relevanz strukturierter Auswahlentscheidungen bei der Designauswahl aufgrund der Vielzahl an möglichen Lösungen sowie der hohen finanziellen Tragweite bei Fehlentscheidungen.

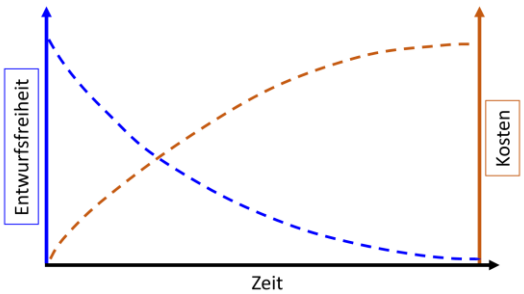


Abbildung 7: Verlauf der Entwurfsfreiheit und der Kosten für eine Designänderung über Phasen des Designs (Buonanno und Mavris 2005). *Eine hohe Entwurfsfreiheit führt zu einer hohen Anzahl an möglichen Lösungen, während die Anpassung dieser Lösung mit fortlaufender Zeit zunehmend teurer wird. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit von Auswahlentscheidungen im Entwurfsprozess.*

Der Entwurfsprozess eines Luftfahrzeuges ist ein Teil des Entwicklungsprozesses. Als etablierter Leitfaden zur Planung und Durchführung dieses Entwicklungsprozesses wird das *V-Modell XT* (Rausch und Broy 2006) als industrieller Standard genutzt. Dieser beginnt mit dem Vorschlag oder dem Antrag für die Entwicklung eines Luftfahrzeuges. Dieser kann bspw. durch das Auftreten eines Konkurrenzproduktes oder im militärischen Bereich durch eine neue Bedrohung motiviert sein. Bereits während dieses ersten Schrittes sind im *V-Modell* einzelne Systeme zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Zur weiteren Ableitung der Anforderungen (*Requirements*) ist ebenfalls eine Bewertung von Luftfahrzeugen notwendig, um ggf. aus der Leistungsfähigkeit der Bedrohungen Rückschlüsse auf die notwendige

Leistungsfähigkeit des eigenen Systems ziehen zu können. Es sind die optimalen Ausprägungen der entsprechenden Kriterien zu spezifizieren, damit das zu entwickelnde Luftfahrzeug seine definierte Nutzenabsicht bestmöglich erfüllen kann.

Anschließend folgt der Entwurfsprozess[28], welcher aus den drei Phasen *Conceptual*, *Preliminary* und *Detailed Design* besteht (Brandt 2015). In der ersten Phase werden unterschiedliche Lösungskonzepte erarbeitet, die den Anforderungen entsprechen. Diese Konzepte werden anschließend hinsichtlich des vielversprechendsten Designs bewertet. In der darauffolgenden *Preliminary Design* Phase wird das ausgewählte Design optimiert und es werden Detailanalysen durchgeführt, um Designparameter festzulegen (Raymer 2002). Daran schließt sich eine Entscheidung der Ingenieure an, ob der Entwurf weiterverfolgt werden soll (Raymer 1989). Für diese Phase gibt es eine Vielzahl von Ansätzen im Rahmen des *Multiobjektive Design Optimization* (Flager und Haymaker 2009; Alexandrov 2005), in welchem Designparameter ganzheitlich variiert und optimiert werden, um schlussendlich Entwürfe zu erhalten, welche ebenfalls zu bewerten sind[29]. Im *Detailed Design* werden die zu fertigenden Komponenten im Detail entworfen sowie Subsysteme optimiert, ohne das Gesamtsystem zu betrachten (Raymer 2002). Speziell in den ersten beiden Phasen wird deutlich, dass Auswahlentscheidungen zu treffen sind, welche sich auf die nachfolgenden Phasen und damit auf den gesamten Entwurf auswirken.

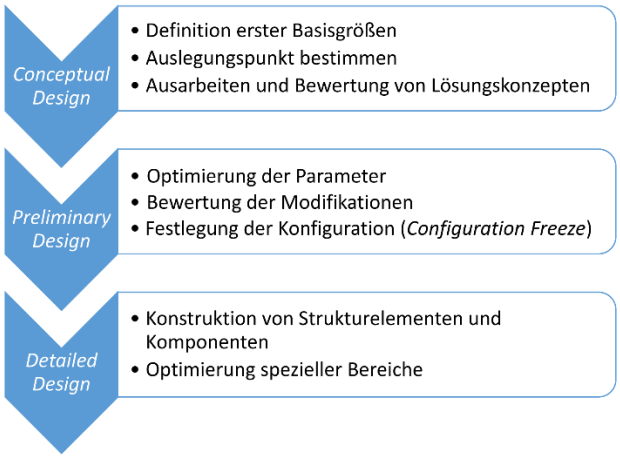


Abbildung 8: Phasen im Entwurfsprozess nach (Raymer 1989). *Speziell in den ersten beiden Phasen sind Auswahlentscheidungen zwischen Konzepten und Modifikationen zu treffen.*

2.1.2.2 Beschaffungsprozess

Die Beschaffung ist das Resultat einer Planungsaktivität (Flottenplanung) und durchläuft verschiedene Phasen, an dessen Ende der Besitzübergang eines Lfz vom Hersteller zum Betreiber steht (Klußmann und Malik 2007). Dieser Prozess gliedert sich allgemein in sechs zeitlich aufeinanderfolgende Phasen, welche wiederum aus verschiedenen Schritten bestehen können (siehe Abbildung 9).

[28] Es besteht die Möglichkeit, ein System auf Basis der Anforderungen zu kaufen, anzupassen (modifizieren) oder neu zu entwickeln. Falls keine existierenden Luftfahrzeuge als marktverfügbare Lösungsvorschläge genutzt werden können, ist eine Neuentwicklung bzw. eine Anpassungsentwicklung im Entwurfsprozess notwendig.

[29] Diese Methoden sind vereinzelt auch im *Conceptual Design* zu finden. *„The area of Conceptual Design has received relatively little attention from the Multiobjective Design Optimization development community.“* (Raymer 2002)

Phase 1: Es finden vorvertragliche Gespräche und Verhandlungen statt, um einen absehbaren konkreten Bedarf eines Bedarfsträgers (Fluggesellschaft, Bundeswehr) zu decken. Die Hersteller informieren auf Basis von RFI (*Request for Information*) bedarfsgerecht über entsprechende Typen und Varianten. Die RFI-Auswertung kann dazu dienen, bestimmte Hersteller in dieser frühen Phase bereits auszuschließen.

Phase 2: Nach einer Konkretisierung der Kaufabsicht wird von Seiten des Bedarfsträgers ein RFP (*Request for Proposal*) erstellt, mit dem die Hersteller zur Abgabe eines Angebotes aufgefordert werden. Dieser enthält bereits Stückzahlen und Leistungsparameter des geforderten Flugzeugtyps. Anschließend werden alle Angebote geprüft und bewertet, um schlussendlich eine Auswahlentscheidung abzuleiten. Dieser folgt ein LoI (*Letter of Intent*) bzw. ein MoU (*Memorandum of Understanding*).

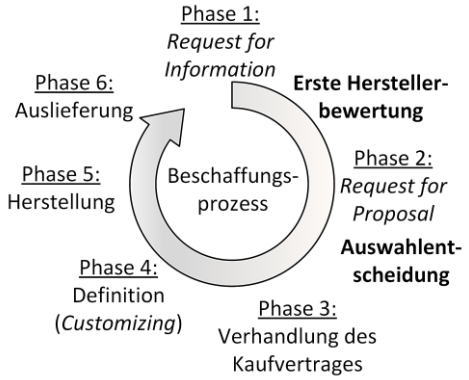


Abbildung 9: Ablauf des Beschaffungsprozesses in sechs Phasen. *Es zeigt sich, dass sowohl nach der RFI- Auswertung als auch nach der RFP- Auswertung Bewertungen bzw. Auswahlentscheidungen durchzuführen sind.*

Phase 3: Von beiden Seiten wird ein Kaufvertrag verhandelt, welcher die genauen Lieferzeiten sowie Stückpreise, Zahlungskonditionen und Sonderregelungen beinhaltet.

Phase 4: In dieser Phase wird die Definition der Ausstattung (Konfigurationen) und Formulierung der RFC (*Request for Change*) vorgenommen. Aufgrund der langen Vorlaufzeit einiger Änderungen werden CDF-Zeitpunkte (*Costumer/Constructual Definition Freeze*) definiert, nach deren Verstreichen keine Änderungen mehr durchgeführt werden. Diese Phase kann im Falle einer Neuentwicklung auch den Entwurfsprozess aus Abbildung 8 (Kapitel 2.1.2.1) enthalten.

Phase 5: Herstellung

Phase 6: Auslieferung

Die Bundeswehr nutzt zur Begleitung der beschriebenen Phasen des Beschaffungsprozesses das *Customer Product Management* (CPM nov.), um zusätzlich eindeutige Entscheidungskompetenzen sicherzustellen. Ein *Integriertes Projektteam* (IPT) formuliert im CPM *Funktionale Forderungen*, welche *„die lösungs- und lösungswegneutrale Beschreibung der Zweckbestimmung einer benötigten Fähigkeit einschließlich aller Funktions- und Gebrauchsmerkmale sowie der zugehörigen Einsatz- und Nutzungsbedingungen beinhaltet“* (Bundesministerium der Verteidigung 2012). Ziel ist dabei die bedarfsgerechte Ableitung von Systemanforderungen, indem *fähigkeitsbestimmende Leistungsparameter*[30] inklusive deren Zielsystem formuliert werden. Diese *Funktionalen Forderungen* des *CPM* zur Schließung einer *Fähigkeitslücke*[31] werden gegeneinander gewichtet und mit klar prüfbaren und objektiven Kriterien hinterlegt. Diese

[30] Begriff aus CPM übernommen, diese sind z.B. *Wirkung, Reichweite, Schutz, Transportkapazität, Aufklärung*

[31] Auf Basis eines priorisierten Fähigkeitsprofils (Soll) und eines aktuellen Fähigkeitsprofils (Ist) können *Soll-Ist* Vergleiche durchgeführt werden. Bei der Identifikation einer Fähigkeitslücke auf Basis einer fehlenden Ressource (bspw. Nichterfüllung

gewichteten Kriterien werden in einem *priorisierten Forderungskatalog* formuliert (Bundesministerium der Verteidigung 2012), welcher als Grundlage für die Bewertung der Lösungsvorschläge und damit zur Ableitung einer Auswahlentscheidung dient. Ein Beispiel für einen militärischen Beschaffungsvorgang in der Vergangenheit ist etwa die Auswahl des Systems SAATEG (System zur Abbildenden Aufklärung in der Tiefe des Einsatzgebietes) als MALE (*Medium Altitude Large Endurance*) Komponente für die Bundeswehr aus dem Jahr 2009. Ziel der Auswahlentscheidung war die Schließung einer Fähigkeitslücke, welche durch zeitkritische Faktoren nicht mit einer Neuentwicklung, sondern mit einer marktverfügbaren Kauflösung realisiert werden sollte. Ein aktuelles Beispiel ist die Nachfolge des Kampfflugzeuges *Tornado* für die deutsche Luftwaffe, welches durch eine marktverfügbare Lösung oder eine Anpassungsentwicklung eines bestehenden Waffensystems realisiert werden soll.

In dem Beschaffungsprozess zeigt sich, dass sowohl nach den RFI als auch nach den RFP Bewertungen bzw. Auswahlentscheidungen zu treffen sind. Die Entscheidungsfindung und die vorangehende Systembewertung ist damit ein fundamentaler Bestandteil sowohl des Beschaffungs- bzw. Entwicklungs- als auch des Entwurfsprozesses (Dieter und Schmidt 2013). Zusätzlich treten im militärischen Bereich im Rahmen der Bedrohungsanalyse ebenfalls Bewertungsprozesse auf, um bspw. ausgehend von den Fähigkeiten feindlicher Luftfahrzeuge deren Bedrohungspotential abzuschätzen und auf Basis des Vergleichs mit den eigenen Wirkmitteln nützliche Informationen für Bedarfsträger abzuleiten (bspw. Taktiken für Piloten). Ausgangspunkt dafür ist der Vergleich der Luftfahrzeuge und weiterführend die Bewertung hinsichtlich der Identifikation von Stärken und Schwächen bzw. Vor- und Nachteilen in Relation zum eigenen System.

2.1.2.3 Charakteristika der Auswahlentscheidungen

Das Treffen dieser Auswahlentscheidungen und damit die Bewertung luftgestützter Systeme stellt eine besondere Herausforderung dar (Stumpf et al. 2011). In der Luftfahrt müssen sich *„Technologien den Weg in das Flugzeug erkaufen“* (Rossow et al. 2014). Nur dann, wenn eine Technologie ihren übergeordneten Nutzen bei verhältnismäßigem finanziellen Aufwand nachweisen kann, wird diese Technologie bei der Entwicklung berücksichtigt. Aufgrund einer Vielzahl solcher *„tauglichen“* Technologien im zivilen wie militärischen Bereich haben moderne Luftfahrzeuge einen hohen Grad der Komplexität erreicht. Damit steigt die Vernetzung zwischen den einzelnen Domänen und dementsprechend der Umfang der Bewertungsaufgabe an. Gepaart mit konfliktären Anforderungen an Luftfahrzeuge wie die Steigerung der Leistungsfähigkeit (Wirkung, Aufklärung) bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten entwickeln sich diese Auswahlentscheidungen zu einer herausfordernden Problemstellung.

---

einer geforderten Fähigkeit) sind Lösungen zur Schließung dieser Lücke zu identifizieren. Bei der Bundeswehr findet die Ermittlung der Fähigkeitslücken im Rahmen des integrierten Planungsprozesses CPM (nov.) statt. Dieser ist eine *„ressortinterne Rahmenanweisung zur fähigkeitsorientierten Bedarfsermittlung, zeitgerechten und wirtschaftlichen Bedarfsdeckung mit einsatzreifen Produkten und Dienstleistungen […].“* (Bundesministerium der Verteidigung 2012)

2.1.2.3.1 Interdisziplinarität und Partizipation

Luftfahrzeuge sind komplexe Systeme, deren Design und komplizierte Bewertung die Zusammenarbeit von Fachleuten erfordert (Flager und Haymaker 2009). Diese Komplexität setzt sich aus einer Vielzahl von Teilbereichen und deren Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen untereinander zusammen, deren detaillierte Betrachtung sowie fachspezifische Berücksichtigung durch den ET allein nicht möglich ist. Zur Ermittlung des Potentials verschiedener Luftfahrzeuge für die Erfüllung der entsprechenden Nutzenabsichten sind unterschiedliche Eigenschaften in ihrer Wichtigkeit relevant. Diese sind nicht nur auf der Systemebene, sondern auch auf der Komponentenebene zu erfassen (siehe Kapitel 2.1.1.2). Die komponentenspezifischen Eigenschaften sind dabei von entsprechenden Fachleuten zu ermitteln und dem ET bereitzustellen. So sind bspw. die relevanten Eigenschaften inklusive deren Wichtigkeit für die Bewertung der Manövrierfähigkeit eines militärischen Luftfahrzeuges in einem Luftkampf von Piloten missionsspezifisch zu ermitteln.

„Für zukünftige Anwendungen sollte eine möglichst weitgehende Einbeziehung der betroffenen Akteure in den Entscheidungsprozess angestrebt werden, insbesondere im Rahmen der Vorauswahl und Gewichtung der zu berücksichtigenden Kriterien."

(Oberschmidt 2010)

Speziell bei der Bewertung luftgestützter Systeme entsteht aufgrund der spezialisierten Missionen ein direkter Bezug zu den Stakeholdern (Beschaffung: Bedarfsträger; Entwurf: Ingenieure), wodurch deren Einbeziehung eine erhöhte Relevanz erreicht. (Li et al. 2016) äußert über den Flugzeugentwurf:

„The complexity of modern aircraft design determines that the conceptual design and evaluation needs the collaboration of experts from different domains."

Solch komplexe Problemstellungen können von ET allein nicht gelöst werden (Banville et al. 1998). Damit ist eine Beteiligung entsprechender Fachexperten zur Steigerung der Legitimität und des Vertrauens in das Ergebnis essentiell. Es sollte verdeutlicht werden, dass die Partizipation strikt an die Expertise gebunden ist und methodisch unterstützt werden sollte. Dabei sollte sich diese jedoch ausschließlich auf die Bereiche beschränken, welche einem subjektiven Einfluss unterliegen (bspw. Gewichtungsfindung, Formulierung der Präferenzen).

2.1.2.3.2 Wechselwirkung zwischen den Eigenschaften

Jedes Luftfahrzeug (Variante bzw. Konfiguration) hat mehrere und verschiedenartige Fähigkeiten, wobei jede Fähigkeit eine entsprechende Ausprägung besitzt. Ein Auszug aus einer allgemeinen Aufstellung der Fähigkeiten ist in Abbildung 10 dargestellt. Eine wichtige Charakteristik der betrachteten Bewertungsaufgabe ist die Wechselwirkung zwischen diesen Fähigkeiten, welche sich teilweise gegenseitig beeinflussen, ersetzen oder ausschließen. Die Präferenzen bzgl. einer Fähigkeit können nicht immer unabhängig von den übrigen Fähigkeiten formuliert werden. Dies soll an dem folgenden Beispiel der Domäne *Aufklärung* verdeutlicht werden: Eine unbemannte Plattform (*Unmaned Aerial Vehicle*, UAV) soll durch Abfliegen eines geografischen Bereiches die Höhendaten des Bodenreliefs vermessen. Dabei ist es in diesem Gedankenexperiment irrelevant, ob die Daten in Echtzeit übertragen oder an Bord gespeichert und danach ausgelesen werden. Dadurch sind die *Übertragungsfähigkeit* und die *Speicherfähigkeit*

zwei substitutive Merkmale. Besitzt das UAV die Fähigkeit zur Übertragung, ist die Speicherfähigkeit nicht weiter zu berücksichtigen und umgekehrt. Die Nichterfüllung einer Fähigkeit ist dabei kein Nachteil für das UAV und darf keine Auswirkung auf das Potential des UAV zur Erfüllung der Nutzenabsicht haben. Eine weitere substitutive Beziehung lässt sich zwischen der *Detektierbarkeit*, der *Trefferanfälligkeit* und der *Verwundbarkeit* feststellen (Ball 2003), welche zum Fähigkeitsbaustein *Überlebensfähigkeit* gehören (siehe Abbildung 10). Ein Luftfahrzeug ist maximal überlebensfähig, wenn es nicht detektiert werden kann. Dabei kann es gleichzeitig maximal trefferanfällig und verwundbar sein. Ist ein Luftfahrzeug zwar detektierbar, allerdings nicht anfällig für Treffer, kann ebenfalls eine maximale *Überlebensfähigkeit* abgeleitet werden.

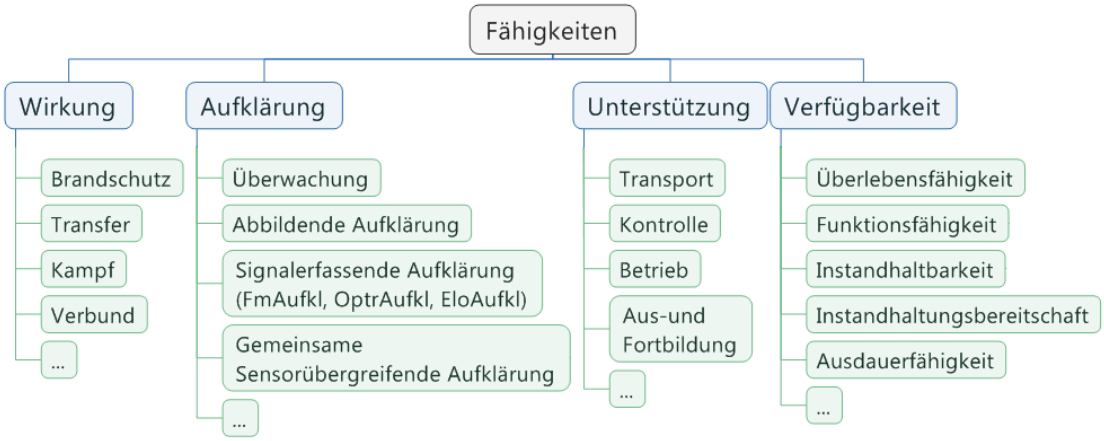


Abbildung 10: Abstrakte Fähigkeiten eines Luftfahrzeuges. *Die Aufstellung zeigt einen Ausschnitt der Fähigkeiten eines Lfz. Dabei werden die 4 Fähigkeitsdomänen in entsprechende Fähigkeitsbausteine unterteilt.*

Diese Abhängigkeiten gilt es zu berücksichtigen, da im Falle einer Nichterfüllung kein Nachteil bei der Bewertung entstehen darf. Zusätzlich zu diesen substitutiven bestehen notwendige Abhängigkeiten, bei denen einzelne Fähigkeiten andere Fähigkeit bzw. Kriterien voraussetzen. Dies ist bspw. bei der Bewaffnung der Fall, bei welcher die Anzahl der mitführbaren Effektoren eine mögliche Zielwirkung bedingt. Ebenfalls setzt eine Objektverfolgung eine vorherige Objektdetektion voraus.

Des Weiteren können zwei oder mehrere Eigenschaften eines Luftfahrzeuges direkt miteinander korreliert sein, so dass sich diese positiv oder negativ beeinflussen. Eine positive Beeinflussung liegt vor, wenn die Verbesserung der Ausprägung einer Eigenschaft zwangsläufig zu einer Verbesserung der Ausprägung einer anderen führt. Ein Beispiel ist die *Instationäre Wenderate* und der *minimale Kurvenradius*. Erhöht sich die *Instationäre Wenderate*, folgt daraus direkt eine Reduzierung des *minimalen Kurvenradius*, was beides zu einer Verbesserung der Kurvenflugleistung führt. Eine negative Korrelation besteht bspw. zwischen der *Detektierbarkeit* und der *Aufklärungsleistung*. Ein UAV soll eine Person am Boden observieren ohne dabei detektiert (auditiv, visuell) zu werden. Bei einem geringeren Abstand zwischen Objekt und UAV steigt die *Aufklärungsleistung* an, jedoch steigt ebenfalls die *Detektierbarkeit*. Diese Interdependenzen zwischen den Fähigkeiten sind zu editieren und bei der Ermittlung des Gesamtergebnisses zu berücksichtigen.

2.1.2.3.3 Nutzenabsicht und die betrachteten Alternativen

Ein Bewertungsergebnis muss auf die Wertvorstellungen des ET ausgerichtet sein (Eisenführ et al. 2010). Bei den in dieser Arbeit betrachteten *Komplizierten Entscheidungssituationen* (vgl. Kapitel 2.1.1.3) ist die Nutzenabsicht der Alternativen durch Missionen vorgegeben, welche von den entsprechenden Stakeholdern definiert werden. Die Nutzenabsicht kann sich auch aus Weisungen oder Richtlinien ableiten lassen[32]. Zur Strukturierung möglicher Nutzenabsichten ist eine Auswahl an verschiedenen Missionen zu berücksichtigen, welche einzeln oder in Kombination das Zielsystem für den Bewertungsprozess bestimmen. Bei der Erfüllung einer Aufklärungsmission ist für ein dominantes Luftfahrzeug trivial, dass die *Aufklärungsleistung* zu maximieren und die *Trefferanfälligkeit* zu minimieren ist. Schwieriger wird die Formulierung des Zielsystems auf einer höheren Detailstufe. Wird beispielsweise die Fluggeschwindigkeit betrachtet, kann aufgrund der gegensätzlichen Abhängigkeit zur *Aufklärungsleistung* und der *Trefferanfälligkeit* nicht festgestellt werden, ob diese zu maximieren oder zu minimieren ist, da das entsprechende Optimum der Fluggeschwindigkeit aus einer Kompromisslösung resultiert.

Die Formulierung der Nutzenabsicht unterscheidet sich von herkömmlichen Entscheidungsproblemen dadurch, dass sie einem geringeren subjektiven Einfluss unterliegen und konsistent aus Richtlinien oder Vorgaben abgeleitet werden kann. Ausgehend von der Nutzenabsicht wird das Zielsystem abgeleitet, welches sich auf die entsprechende(n) Mission(en) bezieht und keiner dynamischen Änderung unterliegt. Beispielsweise sind für die Durchführung einer Aufklärungsmission mit entsprechenden Rahmenbedingungen stets die gleichen Fähigkeiten ausschlaggebend, während ein militärischer ET seine Präferenz dynamisch (zeitabhängig) nach beeinflussenden Faktoren (bspw. Umwelt oder Tagesverfassung) formuliert (Bond et al. 2008). Die Nutzenabsicht wird dabei von den betrachteten Luftfahrzeugen in unterschiedlicher Qualität erfüllt. Oft ist die Menge der betrachteten Alternativen definiert, bspw. bei der Bedrohungsanalyse oder der Marktsichtung. In einigen Fällen allerdings ist die Suche bzw. die Gewinnung von Alternativen eine schwierige und aufwändige Aufgabe (Eisenführ et al. 2010). Soll bspw. eine bestimmte Fähigkeit eines Luftfahrzeugs verbessert werden, sind oft mehrere Modifikationen möglich, welche sich nur durch die technische Machbarkeit begrenzen. Bei der Bewertung von Luftfahrzeugen wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle Alternativen durch deren globale Verfügbarkeit (Marktsichtung), Bedrohungspotential (Bedrohungsanalyse) oder aktuelle Nutzung (Fähigkeitslücke bzw. Projektvorschlag) vorgegeben sind. Ist dies nicht der Fall (bspw. Modifikationen), sind mögliche Alternativen bspw. im Entwurfsprozess (*Conceptual* oder *Prelimiary Design*, siehe Kapitel 2.1.2.1) zu erzeugen, was nicht Teil dieser Arbeit sein soll[33].

---

[32] Ein Beispiel dafür ist das *Weißbuch der Bundeswehr*, welches die strategische Ausrichtung und damit die Aufgaben der Bundeswehr vorgibt. Daraus lässt sich die Nutzenabsicht der luftgestützten Systeme ableiten. Diese Aufgabe übernehmen in diesem speziellen Fall militärische Organisationen wie das *Planungsamt der Bundeswehr*

[33] Zur Erzeugung von Alternativen gibt es bereits eine Vielzahl von Ansätzen. (DeLaurentis et al. 1996; Mavris und Pinon 2010; Sadraey 2013; Kirby 2001)

2.2 Probleme des Menschen bei der Durchführung von Auswahlentscheidungen

Nach (Zimmermann und Gutsche 1991) benötigen alle Auswahlentscheidungen mit Mehrfachzielsetzung eine strukturierte Ergebnisableitung. *„Jeder der solche Entscheidungen verfolgt hat, wird erstaunt gewesen sein über das geringe Maß an systematischer Analyse, das zu beobachten war"* (Eisenführ et al. 2010). Im folgenden Kapitel sollen daher die Schwierigkeiten des menschlichen Entscheidens bei der Bewertung und Auswahl eines Luftfahrzeuges (*Komplizierte Entscheidungssituation*) erläutert werden.

2.2.1 Schwierigkeit richtigen Entscheidens

Generell hat *„der Mensch Schwierigkeiten mit neuartigen, nicht routinierten Entscheidungssituationen"* (Eisenführ et al. 2010). Dabei ist nicht immer mit Gewissheit oder Bestimmtheit vorhersehbar, welche Konsequenzen eine Entscheidung bzgl. der Nutzung eines Luftfahrzeuges mit sich bringt. Mögliche technische Probleme, damit verbundene finanzielle Verpflichtungen oder auch sich ändernde Nutzenprofile aufgrund äußerer Umstände (neue Bedrohungen oder neue Fähigkeiten der Bedrohungen) können nicht mit absoluter Gewissheit vorhergesagt werden. Mit der Unsicherheit über die Entscheidungsfolgen kommt auch die Angst vor den Konsequenzen der meist irreversiblen Entscheidung. Dies drückt das Wort *„ent-scheiden"* bereits aus. Mit der Auswahl scheidet sich der ET von allen anderen Alternativen, und das meist endgültig. Daraus resultiert ein Vermeiden der Entscheidungsfindung.

> *„Es gibt Menschen, die sehr entschieden sind, wenn es darum geht, Entscheidungen zu vermeiden."*
>
> Brendan Francis (1923 - 1964)

Weiterführend können sich die Konsequenzen bei der Wahl verschiedener Luftfahrzeuge in mehr als einer Dimension (Payne 1993) voneinander unterscheiden. Die Wahl zwischen einem UAV mit besserer Missionssensorik, dafür aber deutlich höherer Detektierbarkeit kann gegenüber einem UAV mit geringerer Detektierbarkeit und etwas schlechterer Sensorik schwerfallen. Neben der Unsicherheit bezüglich der Auswirkungen dieser Eigenschaften auf die Erfüllung der Aufgabe hat jedes System eigene Vor- und Nachteile. Den ET interessieren mehrere Eigenschaften wie bspw.: *Ausdauer*, *Reichweite*, *Aufklärung* von Flächen und Punktzielen, *Detektierbarkeit*, *Trefferanfälligkeit* und *Kosten* des Systems. Dabei ist der Entscheider im Zielkonflikt[34], da meist nicht eine Alternative in allen Bereichen dominant ist. Ist die Anzahl verfügbarer Systeme groß und mehr als ein System zur Aufgabenerfüllung geeignet, stellt es den ET vor eine große Herausforderung. Die Menge an Alternativen und Informationen kann schlicht zu groß sein, woraus eine Überforderung resultiert. *Welches System ist gut genug? Welches System bietet das beste Verhältnis von Aufwand zu Nutzen?* Empirische Untersuchungen von (Schwartz 2009) haben gezeigt, dass viele Entscheidungsmöglichkeiten die Menschen überfordern und zu Stress, Frustration und lähmender Unentschiedenheit führen können (Pfister et al. 2017). Das andere Extrem besteht in der Reduzierung des Entscheidungsproblems auf wenige – nicht ausreichende – Parameter, wodurch *„viele Entscheidungen*

[34] Ein Beispiel für einen Zielkonflikt ist der Flugunfall einer Air Florida Maschine am 13. Januar 1982, bei dem die Crew eine Entscheidung traf, welche nicht dem wichtigsten Ziel – der Sicherheit der Passagiere – diente, sondern eher die Vermeidung einer Verspätung präferiert wurde (Sumwalt und Lemos 2010).

in hochkomplexen Entscheidungssituationen allzu oft lediglich auf Basis von einem oder bestenfalls mehreren Ausschnitten eines umfassenden Entscheidungsbildes getroffen werden" (Beisswenger 2016).

Es lässt sich pauschalisieren, dass die Komplexität mit der Anzahl der zu berücksichtigenden Faktoren wächst. Je mehr unsichere Faktoren einwirken, je mehr Ziele und Alternativen zu berücksichtigen sind, desto komplexer wird die Aufgabe (Eisenführ et al. 2010). Dem gegenüber steht die als *Bounded Rationality*[35] bekannte endliche Fähigkeit des Menschen, Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. Nach (Beisswenger 2016) sind die Fähigkeiten des Menschen, komplexe Entscheidungssituationen ganzheitlich zu erfassen und zu begreifen, evolutionsbedingt nicht ausreichend ausgeprägt. Daher ist bei komplexeren Entscheidungen die Bedeutung einer Unterstützung umso größer (Hall 2008).

„*Der Mensch braucht formalisierte Regeln und Prozeduren, um seine teilweise unbewussten, unklaren, widersprüchlichen Erwartungen und Wünsche zu formen und transparent zu machen und um Informationen konsistent zu verarbeiten.*"

(Eisenführ et al. 2010)

2.2.2 Nutzung von Intuition und Heuristiken

Speziell im Bereich der Bewertung luftgestützter Systeme entsteht aufgrund des enormen Fähigkeitsportfolios aus unterschiedlichsten Bereichen und deren Wechselwirkungen und Abhängigkeiten ein ausgesprochen komplexes Entscheidungsproblem. Dieses versetzt den ET in ein Dilemma: wo Vorteile sind, da sind auch Nachteile, und wegen dieser Koinzidenz sind Entscheidungen immer mit der Abwägung dieser Vor- und Nachteile verbunden (Strassert 1995). Für eine gute Entscheidung in der „realen Welt" gilt weniger das Finden der besten Alternative sondern vielmehr das Finden einer geeigneten Alternative (Gigerenzer und Todd 2001). Dabei nutzt der Mensch für komplexe Entscheidungen die gleichen Strategien wie für Entscheidungen unter Zeitdruck oder bei unvollständigen Situationen (Klein 1998). Diese Heuristiken[36] des Menschen sind die Basis für die Intuition oder für spontane Entscheidungen („aus dem Bauch heraus"), welche sich mit einem „guten Gefühl" legitimieren lassen und nicht weiter vom Menschen begründet werden können (Eisenführ et al. 2010). Dabei sind Heuristiken abhängig von Geschlecht und Lebensalter des Entscheiders[37]. Je älter der ET, desto mehr vertraut er auf seine Gefühle aufgrund des größeren Erfahrungsschatzes. (Klein 1998) und (Gigerenzer und Todd 2001) postulieren, dass der Mensch naturgemäß keine strukturierten Ansätze zur Entscheidungsfindung nutzt, sondern in

[35] Einschränkung der menschlichen Entscheidungsfähigkeit, welche durch die Ungewissheit über zukünftige Entwicklungen und durch die nur endliche Fähigkeit, Informationen aufzunehmen, entsteht. (Beisswenger 2016)

[36] Heuristik bezeichnet ein analytisches Vorgehen des Menschen, um mit begrenztem Wissen und wenig Zeit zu einer angemessenen Lösung oder einer korrekten Aussage zu gelangen. Diese Heuristiken sind durch die kognitiven Fähigkeiten des Menschen zur Problemlösung begrenzt. Dabei wird angenommen, dass der Mensch über eine Sammlung heuristischer Entscheidungsstrategien verfügt und je nach Entscheidungssituation die passende Strategie auswählt (Beisswenger 2016).

[37] Weitere beeinflussende Faktoren wie die Umgebung und die Gefühle können in (Powalla 2009) und (Mellers et al. 1998) nachgelesen werden.

seine Heuristiken vertraut. Da diese jedoch begrenzt sind, besitzt der Mensch bei Entscheidungen bestimmte Neigungen, welche speziell bei komplexen Problemen zu fehlerhaften Schlussfolgerungen führen können (Kahneman 2001; Denner 2009).

„Menschen und auch Organisationen neigen dazu, Probleme durch Flickwerk zu lösen; man ändert so wenig wie möglich am Status Quo."

(Eisenführ et al. 2010)

Die Fähigkeiten des Menschen zur analytischen Erfassung komplexer dynamischer Problemstellungen sind nach (Sterman 1989) allgemein begrenzt. Je komplexer die Situation, desto größere Bedeutung erlangt die Unterstützung durch Verfahren zur systematischen Verarbeitung der relevanten Informationen. Bei komplexen Bewertungsaufgaben wie dem Bewerten luftgestützter Systeme ist das menschliche Urteilsvermögen mit dessen Heuristiken überfordert. (Kline 1996) nutzte einen Komplexitätsindex um zu zeigen, dass die menschlichen kognitiven Fähigkeiten um eine Vielzahl geringer sind als die Komplexität der meisten Entscheidungsaufgaben. Dies zeigt, dass die Nutzung von Intuition und rationalem Urteilsvermögen für die meisten Entscheidungsaufgaben unzureichend ist. Nach (Rapoport 1985) besteht die Aufgabe der Entscheidungsunterstützung darin, eine Methode zu entwickeln, um *„wenigstens eine schwache Ordnung in eine Reihe von Vektoren"* der Kriterienausprägungen zu bringen.

2.2.3 Subjektivität in Entscheidungsproblemen

Die Wertvorstellungen eines jeden Entscheiders sind grundsätzlich verschieden (Pfister et al. 2017). Erwartungen und Präferenzen sind subjektiv, was dazu führt, dass zwei Entscheider bei äußerlich gleichen Entscheidungssituationen rational zu einem unterschiedlichen Entscheidungsergebnis gelangen können. Damit wird die Entscheidung „personalisiert" und auf die Wertvorstellungen des ET ausgerichtet (Breiing und Knosala 1997). Diese Ausrichtung des Bewertungsergebnisses auf den ET ist durchaus gewünscht und wichtig, da das Ergebnis der Bewertung und die anschließende Entscheidung auf die individuellen Zielvorstellungen ausgerichtet sein soll. Deshalb wäre eine Eliminierung der Subjektivität – sofern dies möglich wäre – nicht erstrebenswert.

„Decision-theoretic models that explicitly represent the preferences of the decision maker provide numerous advantages for decision-support systems."

(Farr und Shachter 1992)

Viele ET haben die Nutzung von Methoden des *Operations Research* gestoppt, weil die stark vereinfachten Modelle nicht deren Wertvorstellungen wiedergeben konnten (Buchanan et al. 1998). Soll das Ergebnis vom ET akzeptiert werden, muss diesem ein gewisses Maß an Subjektivität eingeräumt werden. Gleichwohl besteht eine Notwendigkeit der systematischen Ermittlung (kollektive Zusammenarbeit von Fachleuten) und Dokumentation dieser subjektiven Faktoren, so dass deren Einflüsse auf das Bewertungsergebnis zurückverfolgt werden können. Die Konstruktion eines Entscheidungsmodells wird dabei nach (Laux et al. 2014) durch eine Vielzahl solcher subjektiven Faktoren bestimmt. Die wichtigsten Faktoren in dieser Arbeit sollen kurz genannt werden:

- *Nutzenabsicht*: Die subjektive Nutzenabsicht ist nicht eindeutig vorgegeben und von jeder Person selbst abhängig. Bei den betrachteten Auswahlentscheidungen wird jedoch davon ausgegangen, dass sich eine eindeutige Nutzenabsicht definieren lässt.
- *Kriterien*: Die berücksichtigten Kriterien haben einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Werden relevante Kriterien nicht berücksichtigt oder irrelevante Kriterien berücksichtigt, wird das Ergebnis verfälscht. Die Ableitung der Kriterien kann ebenfalls durch subjektive Faktoren wie die persönliche Lebenserfahrung beeinflusst werden. Die zu berücksichtigenden Kriterien werden bei einer komplexen Problemstellung interdisziplinär aufgebaut. Dazu ist eine Strukturierung erforderlich, welche den subjektiven Einfluss eines ET durch den Mittelwert der kollektiven Zusammenarbeit von Fachleuten minimiert.
- *Alternativen*: Die betrachteten Luftfahrzeuge hängen bspw. von deren Verfügbarkeit (marktverfügbares Angebot), den finanziellen Möglichkeiten der Stakeholder (Beschaffungsprozess) oder den einzelnen Entwürfen im Entwurfsprozess ab. Bei der Bedrohungsanalyse werden alle potentiellen Bedrohungen in die Bewertung einbezogen.
- *Präferenzen*: Die Wertvorstellungen der Stakeholder werden über Gewichtungen und Wertfunktionen definiert. Letztere beschreiben, ab wann ein Vorzugswert eines Systems vorliegt. Diese Wertvorstellungen hängen ebenfalls von bestimmten Umständen des ET ab, können allerdings durch die Definition von Fachleuten in einem gewissen Maß objektiviert werden.

2.2.4 Vertrauensgrad in eine Bewertung

Die Grundlage für die bereitwillige Übernahme von Verantwortung für weitreichende Entscheidungen seitens des ET ist die Reproduzierbarkeit und das Vertrauen in die Ergebnisse. Zur Einschätzung des Vertrauensgrades stehen nach (Breiing und Knosala 1997) die Fragen nach *Objektivität*, *Plausibilität* bzw. *Transparenz* und *Robustheit* an wichtigster Stelle[38].

Die uneingeschränkte *Objektivität* bzgl. der Bewertungsergebnisse wurde bereits im vorherigen Kapitel ausgeschlossen. Es soll vielmehr versucht werden, durch geeignete Maßnahmen wie bspw. die Wahl quantifizierbarer Entscheidungskriterien, die Ausprägungsermittlung mit Berechnungsvorschriften, die kollektive Zusammenarbeit von Fachleuten und die Ermittlung subjektiver Parameter mit geeigneten wissenschaftlichen Methoden die *Subjektivität* zu reduzieren.

Generell wird die *Plausibilität* eines ermittelten Bewertungsergebnisses aufgrund der Vielzahl an zu betrachtenden Daten reduziert. Wie im Kapitel 2.2.1 beschrieben, besitzt der Mensch Eigenschaften, die es ihm unmöglich machen, komplexe Probleme ohne Hilfestellung durchdringen zu können. Ein Bewertungsergebnis einer komplexen Entscheidungsaufgabe ist für den ET plausibel, wenn dieses *einleuchtend*, *verständlich* und *begreiflich* ist. Dabei ist es nicht zielführend, die Vielzahl der betrachteten, teilweise konfliktären Fähigkeiten und Kriterien simultan darzustellen. Ist der ET nicht in der Lage, diese Informationen in eine Einheit zu überführen, kann für ihn die Zusammensetzung des Gesamtergebnisses nebulös und damit nicht plausibel erscheinen. Daher scheint es angezeigt, die Vielzahl an Informationen

[38] Diese Kriterien werden bei der konzeptionellen Validierung in Kapitel 6.3.1.3 erneut aufgegriffen.

in einer entsprechenden Struktur zu verwalten und dem ET portioniert darzustellen. Diese Dekomposition in Zwischenergebnisse bzw. Aggregation dieser zu einem Gesamtergebnis schafft eine *Transparenz*, welche schlussendlich die *Plausibilität* fördert.

Die *Robustheit* bzw. die *Sensibilität* des Ergebnisses ist ein Maß für die Abhängigkeit von einzelnen Faktoren wie bspw. Gewichtungen oder Kriterienausprägungen. Ändert sich ein Bewertungsergebnis bei einer kleinen Änderung der Faktoren, führt diese *Sensibilität* zu einer nicht robusten Rangfolge und damit zu einem sensiblen Ergebnis. Diese *Sensibilität* kann mathematisch ermittelt werden, was vor allem bei umfangreichen und nicht überschaubaren Zusammenhängen sinnvoll ist.

Eine vertrauensbildende Maßnahme ist die Erhöhung der beschriebenen *Robustheit*, *Objektivität* und *Plausibilität* durch eine geeignete Entscheidungsunterstützung, welche eine systematische, methodengestützte, transparente und reproduzierbare Entscheidungsfindung erst ermöglicht.

2.3 Entscheidungsunterstützungssysteme

Entscheidungsunterstützungssystem (*Decision Support System*, DSS) ist ein Begriff, welcher aus den Forschungen am MIT[39] aus den 1970er Jahren hervorging (Keen und Scott Morton 1978). Die Definition beinhaltete die Unterstützung menschlicher ET durch computergestützte Systeme zur Verarbeitung von Informationen und Ableitung „besserer" Entscheidungen (Olson 2008)[40]. Damit sind DSS *„interactive computer based systems, which help decision makers utilize data and models to solve unstructured problems"* (Sprague 1980). Das Ziel eines DSS ist sowohl die Steigerung der Effizienz als auch die Verbesserung der Qualität der Entscheidung (Turban 1990). Der Vorteil eines DSS ist allgemein eine rationalere Entscheidung durch einen rationaleren Entscheidungsprozess. Nach (Holsapple und Sena 2005) sind allgemeine Vorteile von DSS eine bessere Wissensverarbeitung, eine bessere Bewältigung komplexer Probleme sowie die Begründung von und der Vertrauensgrad in Entscheidungen. Dabei kann ein DSS keine Problemlösung selbstständig generieren, sondern eher eine Entscheidungshilfe für dessen Bearbeitung bereitstellen (Werner 1992). Es hat damit einen beratenden Charakter und gibt dem ET die notwendigen Werkzeuge zur Ableitung einer Auswahlentscheidung an die Hand. Nach (Mertens 1987) sind DSS damit eine spezielle Gruppe von Expertensystemen.

Dabei können Simulationsmodelle Bestandteile von DSS sein. Ein Simulationsmodell kann allgemein dazu genutzt werden, um die betrachteten Alternativen detaillierter zu untersuchen und relevante Daten zu generieren (bspw. Ausprägungen).

„Die beiden Instrumente DSS und Modell sind als gegenseitige Ergänzung zu verstehen: Während ein DSS Handlungsoptionen anhand bestimmter Zielvorstellungen und Indikatoren bewertet und somit eine Reihung verschiedener Maßnahmen ermöglicht, kann ein Modell eingesetzt werden, um im Anschluss detaillierte Fragen im Zusammenhang mit der Umsetzung der präferierten Maßnahme zu beantworten."

(Kofalk und Kühlborn 2001)

---

[39] *Massachusetts Institute of Technology*

[40] Weitere Definitionen für DSS können bei (DeSanctis und Gallupe 1987) gefunden werden

Das Problem, welches mit einem DSS gelöst werden soll, ist inhaltlich komplex und umfangreich. Es kann allgemein als semistrukturiert bezeichnet werden. Dabei werden die expliziten Wertvorstellungen des ET berücksichtigt. Zur Unterstützung bei der Lösungsfindung werden meist implizite Simulationsmodelle genutzt, was auch einen vielversprechenden Ansatz für diese Arbeit darstellt.

2.3.1 Anwendungsprobleme bei entscheidungsunterstützenden Verfahren

Es besteht eine große Lücke zwischen der Entwicklung solcher DSS und ihrer tatsächlichen Anwendung in realen Entscheidungssituationen (Nitzsch 1992). Die Gründe für diese Anwenderlücke sind vielseitig. Nach (Pfohl 1976) lässt sich der Nutzen von Verfahren zur Entscheidungshilfe oder -unterstützung nur schwer nachweisen. Bei einer monokriteriellen[41] Zielsetzung kann auf Basis der abgeleiteten Kennzahl (bspw. Kosten) direkt eine rationale Entscheidung getroffen werden, wodurch für viele Entscheider eine Unterstützung unnötig ist. Anders verhält es sich bei der Betrachtung von multikriteriellen Zielsetzungen. Dabei unterschätzen viele Entscheider die Komplexität dieser Problemstellungen und vertrauen mehr auf deren Intuition, wodurch sie sich über den Umfang der Entscheidungsaufgabe nicht bewusst werden (siehe Kapitel 2.2.2). Experten benutzen meist flexible Lösungsstrategien und keine eindeutigen Vorschriften (Kurbel 1989). Sie entwickeln eine *„intuitive Vorstellung von dem Anwendungsgebiet in Form eines kausalen Modells“* (Kurbel 1989). Weiterhin können bei den Nutzern allgemein ein Nichtverstehen der Entscheidungshilfe bzw. des theoretischen Hintergrunds sowie ein größeres Vertrauen auf eine persönliche Erfahrung (Heuristiken, siehe Kapitel 2.2.2) vorliegen (Carlsson und Turban 2002).

(Fischer 1979) kritisiert die begrenzten Fähigkeiten von mathematischen Modellen zur Berücksichtigung menschlicher Wertvorstellungen. Bei der Abbildung der subjektiven Präferenzstruktur in ein mathematisches Modell können die vielen Elemente des menschlichen Entscheidungsprozesses[42] nicht berücksichtigt werden. Viele ET haben die Nutzung von Methoden des *Operations Research* gestoppt, weil die stark vereinfachten Modelle nicht deren Wertvorstellungen wiedergeben konnten (Buchanan et al. 1998). Weiterhin kann der ET seine Wertvorstellungen nicht artikulieren. Die Umgangssprache ist bspw. voll von unscharfen Ausdrücken wie *„höchstwahrscheinlich“*, *„eventuell“* und *„vermutlich“*. Ebenso vage drückt der Mensch seine Präferenzen aus (Eisenführ et al. 2010). Dadurch können nach (Fischer 1979) die Parameter für das vermeintlich *„korrekte“* Modell nicht ermittelt werden. Die Befragungsmethoden haben dabei einen direkten Einfluss auf die ermittelten Modellparameter, was durch eine Vielzahl empirischer Untersuchungen belegt wurde[43]. Mit diesen Untersuchungen wird die Problematik der Ermittlung der Wertvorstellung des ET verdeutlicht, was die Notwendigkeit einer Unterstützung zur Bearbeitung dieser Problemstellung speziell bei komplexen Auswahlentscheidungen hervorhebt und nicht ausschließt (Tversky 1978).

---

[41] Es wird nur ein Ziel verfolgt, bspw. Minimierung der Kosten

[42] Die Komplexität des menschlichen Denkens und Entscheidens wird in (Klein 1998) weiter ausgeführt.

[43] Vgl. (Schoemaker und Waid 1982) und (Hershey et al. 1982)

Weiterhin setzen die Entscheidungshilfen voraus, dass der Entscheider seine tatsächlichen Erwartungen und seine Präferenzen rückstandslos offenlegt. Diese Transparenz ist für eine reproduzierbare Entscheidung unerlässlich, liegt jedoch nicht immer im Interesse des Entscheiders. Offenheit gegenüber Dritten reduziert die taktischen Möglichkeiten und kann eine Opposition hervorrufen (Eisenführ et al. 2010). Diese Transparenz macht den ET bei einer späteren Überprüfung angreifbar, weil die schlussendliche Entscheidung möglicherweise nicht mit dem objektiv ermittelten Ergebnis des strukturierten Verfahrens übereinstimmt und die getroffene Entscheidung damit nicht zu legitimieren ist. Ist solch ein Entscheider selbst für die Nutzung von unterstützenden Verfahren verantwortlich, wird er sich deshalb dagegen entscheiden.

Nach (Pitz und Sachs 1984) besteht zudem eine mangelnde Akzeptanz der Verfahren durch den eingeschränkten bzw. nicht existierenden Praxisbezug. Dabei sind als Hauptgrund die unterschiedlichen Zielsetzungen zwischen den wissenschaftlich ausgerichteten Entwicklern der Verfahren und den Entscheidern zu nennen (Pfohl 1976). Die Entwicklung ausgereifter Verfahren erfordert ein interdisziplinäres Vorgehen, was die Entwickler meist nicht berücksichtigen. Weiterhin fehlt den Anwendern der Anreiz, an der Entwicklung geeigneter Vorgehen mitzuwirken. Die Nutzung nicht bekannter Vorgehen erfordert Einarbeitung, was ebenfalls eine Ablehnung hervorruft (Brown 1989).

Diese Probleme bzw. Gründe für eine Anwenderlücke lassen sich allgemein auf die Untauglichkeit bestehender Verfahren zur Unterstützung bei einer speziellen Bewertung- bzw. Entscheidungsaufgabe zurückführen. Daher soll für die Bewertung und den Vergleich luftgestützter Systeme in dieser Arbeit ein probates Verfahren vorgeschlagen werden, dessen Tauglichkeit zur Entscheidungsunterstützung mit qualifizierten ET und Fachleuten abschließend validiert wird (siehe Kapitel 6.3). Im Folgenden werden die Anforderungen an ein solches Verfahren abgeleitet.

2.3.2 Konzeptionelle Anforderungen an ein Unterstützungssystem

Resultierend aus der beschriebenen Insuffizienz des menschlichen Entscheidungsvermögens[44] (Kapitel 2.2) und den Anforderungen bei der Bewertung luftgestützter Systeme (Kapitel 2.1.2.3) ergibt sich die Fragestellung, wie solch ein komplizierter Bewertungsprozess methodisch zu unterstützen ist, so dass der Mensch mit seinen kognitiven Fähigkeiten eine Bewertung luftgestützter Systeme mit folgenden Eigenschaften durchführen kann.

A1. *Missionsorientiert* (siehe Kapitel 2.1.2.3.2): Die Ausrichtung des Bewertungsergebnisses soll anhand einer zu erfüllenden Nutzenabsicht erfolgen. Alle Aspekte der Systembewertung inklusive ihrer Wechselwirkungen (Korrelationen) sollen Berücksichtigung finden. Eine pauschale und alleinige Betrachtung bestimmter Eigenschaften wie bspw. der Flugleistungen ist nicht ausreichend.

A2. *Transparent* (siehe Kapitel 2.2.4): Ausgehend von der zugrundeliegenden Datenbasis der Bewertungsaufgabe sollen alle Parameter und Wertvorstellungen sowie Abhängigkeiten zwischen den

[44] Unterschiedliche Bezeichnungen der Fähigkeiten zum komplexen Problemlösen lassen sich bei (Funke 1992) finden: *„heuristische Kompetenz“*, *„komplexe Problemlösungsfähigkeit“*, *„Fähigkeit zum Umgang mit komplexen, vernetzten Systemen“*, *„Problemlösungskompetenz“* und *„Fähigkeit zum vernetzten, systemischen und ganzheitlichen Denken“*.

Kriterien eingesehen werden können. Die Transparenz bezieht sich dabei ausschließlich auf die Datenbasis, während die Nachvollziehbarkeit die Rückverfolgbarkeit der Ergebniszusammensetzung beschreibt. Zu der Transparenz zählt auch die Ermittlung der Ausprägungen der Kriterien.

A3. *Nachvollziehbar* (siehe Kapitel 2.2.4): Neben dem Gesamtergebnis (Potential) sollen Zwischenergebnisse für die Systemeigenschaften auf unterschiedlichen Detailstufen (Abstrahierungsgraden) bestimmt werden, um Stärken und Schwächen der Luftfahrzeuge in einzelnen Teilbereichen ermitteln und darstellen zu können. Durch eine geeignete Darstellung des Zielsystems und der Ergebnisse kann der ET sein Bewertungsergebnis vertreten und damit seine Entscheidung begründen (Verantwortung).

A4. *Robust* (siehe Kapitel 2.2.4): Für ein vertrauensvolles Bewertungsergebnis ist es wichtig, dass die Sensitivität des Ergebnisses hinsichtlich der Datenbasis überprüft wird. Dazu sind Unsicherheiten in persönlichen Wertvorstellungen oder Kriterienausprägungen zu berücksichtigen und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse zu analysieren.

A5. *Objektiv* (siehe Kapitel 2.2.3): Es soll eine Minimierung des subjektiven Einflusses durch eine wissensbasierte und methodische Entscheidungsunterstützung realisiert werden.

Nach (Breiing und Knosala 1997) kann die *Objektivität*, *Robustheit* und *Plausibilität* (*Transparenz* und *Nachvollziehbarkeit*) auch zum Vertrauensgrad zusammengefasst werden. Bei den konzeptionellen Anforderungen sollen diese im Folgenden allerdings getrennt betrachtet werden. Die o.g. allgemeinen Anforderungen an ein Entscheidungsunterstützungssystem werden im Folgenden spezifiziert (dekomponiert) und genauer erläutert[45]. Diese sind im Einzelnen:

A1: Missionsorientierung:

A1.1 Herstellung einer Verbindung zwischen der (den) Mission(en) und den Kriterien (siehe Kapitel 2.1.2.3.3)

Grundlage für die missionsorientierte Bewertung ist die Berücksichtigung deskriptiver Kriterien und deren Gewichtungen, da eine Berücksichtigung nicht relevanter Kriterien oder eine Nichtberücksichtigung relevanter Kriterien zu einer Verfälschung des Ergebnisses führt. Daher sind die Kriterien strukturiert von der zugrundeliegenden Nutzenabsicht abzuleiten.

A1.2 Ganzheitliche Betrachtung der Systemfähigkeiten (siehe Kapitel 2.1.2.3.2)

Zur ganzheitlichen Bewertung eines Luftfahrzeuges für die Missionserfüllung sind alle relevanten Fähigkeiten zu betrachten. Dazu ist die ganzheitliche Betrachtung in einer entsprechenden Methodik vorzusehen. Die ausgewählte Betrachtung einzelner Fähigkeiten oder Kriterien zur Erfüllung einer Mission ist unzureichend.

[45] Gleichzeitig gibt es weitere Anforderungen an die zu verwendende Methodik der Entscheidungstheorie, welche detailliert in Kapitel 4.2.3.6 behandelt werden und nicht zum allgemeinen Konzept gehören.

A1.3 Berücksichtigung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien (siehe Kapitel 2.1.2.3.2)

Es sind Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Kriterien zu identifizieren und zu berücksichtigen. Wechselwirkungen beschreiben dabei die positive oder negative Korrelation der Kriterien. Diese liegt vor, wenn eine Verbesserung eines Kriteriums zu einer Verschlechterung oder ebenfalls zu einer Verbesserung des anderen führt. Eine Abhängigkeit beschreibt hingegen das Ersetzen oder das Voraussetzen eines Kriteriums. Setzt ein Kriterium ein anderes voraus (bspw. *Objektverfolgung* setzt *Objekterkennung* voraus) oder ersetzt ein Kriterium ein anderes (bspw. *Detektierbarkeit* ersetzt *Verwundbarkeit*), ist diese Abhängigkeit bei der Ergebnisberechnung zu berücksichtigen. Ohne Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen und Abhängigkeiten würde eine Verfälschung der Ergebnisse resultieren.

A1.4 Nutzung von Expertenwissen (siehe Kapitel 2.1.2.3.1)

Auf Basis des multidisziplinären Charakters der Bewertungsaufgabe sind spezielle Kriterien aus fachspezifischen Teilbereichen (bspw. Sensorik oder Bewaffnung) dem Prozess beizustellen, da dieses profunde Wissen evtl. nicht vom ET beigestellt werden kann und dieser damit auf das domänenspezifische A-Priori Fachwissen von Experten aus den einzelnen Teilbereichen angewiesen ist.

A1.5 Berücksichtigung der Wertvorstellungen des ET (siehe Kapitel 2.2.3)

Zur Betrachtung spezieller Wertvorstellung der ET oder missionsbedingten Besonderheiten ist die Möglichkeit vorzusehen, die Datenbasis entsprechend anzupassen (siehe Kapitel 2.3.1). Dies zählt sowohl für die Kriterienstruktur als auch für die entscheidungsrelevanten Parameter sowie die Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen. Eine visuelle Rückmeldung bzw. Bestätigung der getätigten Anpassungen ist für das Situationsbewusstsein des ET unabdingbar. Weiterhin ist zu beachten, dass alle benutzerdefinierten Anpassungen dokumentiert werden.

A2: Transparenz:

A2.1 Strukturierung der zugrundeliegenden Datenbasis (siehe Kapitel 2.2.2)

Die Forderung nach Vereinfachung ist unerlässlich, um ein gedankliches Durchdringen der komplexen Entscheidungssituation zu gewährleisten (Rohr 2004). Aufgrund der Vielzahl an zu betrachtenden Parametern ist eine Datenbasis entsprechend aufzubereiten und zu strukturieren, damit diese Daten möglichst übersichtlich (transparent) abgelegt werden können. Zu diesen Daten zählen die Kriterienstruktur sowie die relevanten entscheidungstheoretischen Parameter (Gewichtung, Präferenzen) als auch eventuelle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien.

A3: Nachvollziehbarkeit:

A3.1 Plausible Ermittlung der Bewertungsergebnisse auf unterschiedlichen Detailstufen mit Hilfe eines Erfüllungspotentials (siehe Kapitel 2.2.4)

Das Ergebnis der Bewertungsaufgabe soll die Ermittlung einer metrischen Rangfolge sein, welche neben den ordinalen Informationen (Rangfolge) auch relative Informationen (Intensität zwischen den Rängen) enthält. Dazu ist ein Potential zu berechnen, welches die Fähigkeit des Luftfahrzeuges zur Erfüllung der definierten Nutzenabsicht beschreibt. Dieses Potential soll nicht nur die Gesamtfähigkeit (bspw. Potential

zur Erfüllung einer *Aufklärungsmission*), sondern ebenfalls Teilpotentiale zur Erfüllung von Subfähigkeiten oder Kriterien enthalten. Damit kann sowohl das Gesamtpotential des Luftfahrzeuges als auch die Stärken und Schwächen berücksichtigt werden, wodurch sich die Zusammensetzung des Gesamtergebnisses aus den unterschiedlichen Teilergebnissen in den höheren Detailierungsgraden transparent nachvollziehen und reproduzieren lässt.

A3.2 Nachvollziehbare Darstellung des Ergebnisses (siehe Kapitel 2.2.4)

Die ermittelten Ergebnisse in den einzelnen Detailstufen der Hierarchie sind entsprechend so darzustellen, dass sowohl Stärken und Schwächen als auch das Gesamtpotential und die einzelnen Fähigkeiten der betrachteten Plattformen dem ET bedarfsgerecht visualisiert werden können. Dazu sind geeignete Darstellungsformen zu nutzen, welche das Ergebnis übersichtlich, aber dennoch in vollem Informationsumfang auf allen Ebenen wiedergeben. Weiterhin ist eine Darstellung der Nutzen/Kosten Relation zu realisieren.

A4: Robustheit:

A4.1 Überprüfung der Robustheit der Bewertungsergebnisse

Zur Überprüfung der Robustheit des Ergebnisses sind globale und lokale Sensitivitätsanalysen durchzuführen, welche untersuchen, *„wie stabil diese Lösung gegenüber Variationen der verarbeiteten Informationen ist“* (Eisenführ et al. 2010). Damit können sensible Daten des Zielsystems offengelegt, Signifikanzen für die Gewichtungen und Ausprägungen ermittelt sowie Faktoren für eine Rangfolgenänderung identifiziert werden.

A4.2 Ermittlung der Korrelationen zwischen Kriterien bzw. Fähigkeiten und dem Gesamtergebnis

Zur Behandlung von Unsicherheiten sind statistische Verfahren zu implementieren, welche eine globale Sensitivitätsanalyse ermöglichen. Damit können die statistischen Abhängigkeiten zwischen den Eingangs (Präferenzinformationen, Ausprägungen)- und Ausgangsvariablen (Systempotential) des Bewertungsprozesses beschrieben werden.

A5: Objektivität:

A5.1 Methodische Ableitung einer missionsorientierten Gewichtungsverteilung und weiterer Entscheidungsparameter wie bspw. Ziel- und Präferenzfunktionen durch Fachexperten (siehe Kapitel 2.1.2.3.1)

Neben der Struktur der bewertungsrelevanten Kriterien ist deren Gewichtungsverteilung mit Hilfe eines methodischen Vorgehens zu ermitteln. Die Gewichtung hat neben den Kriterien selbst und deren Ausprägung einen erheblichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis (Zardari et al. 2015). Zur Ableitung adäquater Gewichtungen ist eine methodische Unterstützung bereitzustellen, welche die begrenzten Fähigkeiten des Menschen zur simultanen Erfassung und Verarbeitung von Informationen berücksichtigt. Zusätzlich zu der Gewichtungsverteilung sind kriterienspezifische Ziel- und Präferenzfunktionen zu definieren. Die Ermittlung dieses Zielsystems besitzt ebenfalls einen multidisziplinären Charakter und sollte daher in dem A-Priori Wissen inkludiert sein.

A5.2 Objektive Ermittlung der Kriterienausprägung (siehe Kapitel 2.2.3)

Zur Ermittlung des Systempotentials sind die Kriterien zu quantifizieren und deren Ausprägung möglichst objektiv mit Hilfe geeigneter Berechnungsmodule zu bestimmen. Neben der objektiven Ermittlung der Ausprägungen durch Berechnungen, Simulationen oder Flugversuche können diese ebenfalls subjektiv durch Expertenschätzungen ermittelt werden, was allerdings in Bezug auf die Transparenz und Reproduzierbarkeit bei der Ergebnisdarstellung zu vermerken ist. Im Falle einer objektiven Ermittlung sind geeignete Berechnungsumgebungen zu entwickeln und dem Prozess beizustellen.

A5.3 Berücksichtigung konfliktärer Kriterien und fachspezifischen Expertenwissens zur Ergebnisberechnung (siehe Kapitel 2.1.2.3.2)

Das multikriterielle Zielsystem besteht aus sich teilweise ausschließenden Kriterien, welche gleichzeitig zur Ermittlung des Gesamtpotentials berücksichtigt werden müssen. Weiterhin sind detaillierte Betrachtungen einzubeziehen, ab wann sich bspw. eine direkte Präferenz eines Luftfahrzeuges ergibt[46]. Dazu sind Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie (engl. *Multi Criteria Decision Analysis*, MCDA) notwendig, welche speziell bei komplexen Entscheidungen genutzt werden (Figueira et al. 2005).

Weiterführender *Use Case*:

Der folgende *Use Case* soll nicht als konzeptionelle Anforderung an das Konzept sondern vielmehr als weiterführende Anwendungsmöglichkeiten verstanden werden.

UC Ableitung optimierter Kriterienausprägungen

Auf Basis der Bewertungsergebnisse können Spezifikationen abgeleitet werden, damit ein Luftfahrzeug zur bevorzugten Alternative für die Erfüllung einer Nutzenabsicht wird (*Requirements Engineering*). Dazu sind unter Berücksichtigung des Zielsystems optimierte Kriterienausprägungen abzuleiten, welche als Systemanforderungen in einem Entwurfsprozess (siehe 2.1.2.1) dienen können.

Insgesamt ist ein Ansatz zur Unterstützung des Bewertungsprozesses zu entwickeln, welcher dem ET ein methodengestütztes Vorgehen zur Verfügung stellt. Dieser soll insbesondere dazu dienen, die komplexe Bewertungsaufgabe zu strukturieren (Reduktion der Komplexität) und eine anwendungsbezogene Wissensbasis bereitzustellen. Diese ist in der Regel bei der späteren Nutzung laufend zu erweitern (Kurbel 1989). Dabei ist der schmale Grat zwischen Handhabbarkeit der Bewertungsaufgabe und Informationsverlust zu berücksichtigen.

Anhand dieser konzeptionellen Anforderungen soll im folgenden Kapitel eine Sichtung bereits existierender Ansätze und Verfahren zur Unterstützung von Auswahlentscheidungen luftgestützter Systeme durchgeführt werden. Weiterhin dienen diese Anforderungen als Grundlage für die Ableitung des Konzeptes (Kapitel 4) und dessen abschließende Validierung (Kapitel 6.3).

---

[46] Für eine detaillierte Bewertung ist es wichtig, dass schwache und starke Präferenzen sowie Bereiche der Indifferenz berücksichtigt werden. Für den Bereich der Wenderate eines Kampfflugzeuges gibt (Herbst 1980) bspw. an, dass ein direkter Vorteil erst ab einem Unterschied in der Wenderate von 3°/s vorliegt. Ist die Differenz kleiner, besteht kein direkter Vorteil für einen Piloten und damit eine Indifferenz zwischen den Luftfahrzeugen.

3. Aktueller Stand der Bewertungsverfahren für Luftfahrzeuge

Um eine Sichtung bereits bestehender Ansätze fokussiert durchführen zu können, werden die Anforderungen an das Bewertungskonzept des zu entwickelnden Unterstützungssystems aus Kapitel 2.3.2 genutzt. Dabei werden bestehende Ansätze zur Bewertung von Luftfahrzeugen hinsichtlich der Übereinstimmung mit der aufgestellten Spezifikation untersucht und deren Potential bzw. Defizite erörtert, um deren Eignung für den Einsatz in dieser Arbeit bewerten zu können.

Die folgenden Ausführungen sind in zwei Bereiche gegliedert. Während im ersten Teil die bestehenden Ansätze zur Systembewertung mit den Konzeptanforderungen verglichen werden, beinhaltet der zweite Teil des Kapitels die Methodensichtung der multikriteriellen Entscheidungstheorie, welche im Rahmen einer Bewertung luftgestützter Systeme bereits Anwendung gefunden haben. Eine Bewertung der Methoden findet nach deren theoretischen Betrachtung bei der Umsetzung des Konzeptes in Kapitel 4.2.3.6 statt.

3.1 Ansätze zur Bewertung von Luftfahrzeugen

In der Literatur lassen sich unterschiedliche Ansätze aus einem breiten Anwendungsbereich zur Strukturierung und Durchführung von Entscheidungsvorhaben finden. Beispielhaft seien die Bereiche der medizinischen Diagnose und Behandlung (Wright und Ng 2012), der Programmentwicklung (Edwards und Newman 1998), betrieblichen Planung (Ballou und Mohan 1981), Planung von Infrastruktur (Coutinho-Rodrigues et al. 2011), Logistik (Wanke und Zinn 2004) und militärischen Strategien (Soban und Mavris 2001) genannt.

Ziel dieser Analyse ist es festzustellen, inwieweit bereits spezielle Entscheidungsmodelle als auch generische DSS entwickelt wurden, welche die missionsorientierte Bewertung von Luftfahrzeugen unterstützen können. Erstere dienen im Wesentlichen zur Ableitung eines Bewertungsergebnisses aus einem vorgegebenen Zielsystem. Sie sind jedoch nicht in der Lage, die Kriterienausprägungen selbst zu bestimmen oder funktionale Abhängigkeiten zu visualisieren. Hier setzen die DSS an, welche den ET bei der Durchführung der Bewertungsaufgabe unterstützen (Adelman 1992; Sage 1991). Die Zielsetzung dieser Systeme ist die Ausprägung entscheidungsrelevanter Kriterien durch Informationsverarbeitung und Modellierung der Abhängigkeiten zu ermitteln und sinnvoll aufzubereiten (Flager und Haymaker 2009). Dabei soll allerdings keine automatisierte Entscheidung, sondern vielmehr eine objektive Unterstützung für den ET in Form einer Handlungsempfehlung abgeleitet werden.

Im Folgenden werden ausschließlich Bewertungsmodelle aus dem Anwendungsbereich der Bewertung von Luftfahrzeugen betrachtet. Eine domänenübergreifende Sichtung lässt sich im Anhang finden. Jedes Bewertungsmodell oder DSS wird mit den Konzeptanforderungen gegenübergestellt, d.h. die gesichteten Verfahren werden hinsichtlich der einzelnen Anforderungen überprüft. Dabei werden folgende Symbole verwendet:

+	gänzliche Erfüllung der Anforderung
o	teilweise Erfüllung der Anforderung
–	keine Erfüllung
ka	keine Aussage ableitbar

Zur Gruppierung der verschiedenen Modelle sollen deren Einsatzbereich bzw. betrachtete Systeme dienen. Folgende Klassen sollen dabei unterschieden werden:

- Modelle für bemannte fliegende Plattformen
- Modelle für unbemannte fliegende Plattformen
- Ansätze für Entscheidungsunterstützungssysteme

3.1.1 Modelle zur Bewertung bemannter Luftfahrzeuge

Ein speziell für Transportsysteme geltendes Bewertungsmodell wurde von (Milan 2010) vorgeschlagen, welches operationelle, sozio-ökonomische und ökologische Kriterien betrachtet. Das Zielsystem besteht ausschließlich aus den Kriterien und deren Zielfunktion. Diese werden mit Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie in ein Bewertungsergebnis überführt, ohne Abhängigkeiten der Kriterien oder Bereiche von Indifferenzen zu berücksichtigen. (Milan 1993) hat für die Bewertung zwischen Transportsystemen auf der Schiene und in der Luft Kostenfunktionen für das Luftfahrzeug und die Passagiere entwickelt, um diese Funktion anschließend zu minimieren und damit das beste System durch eine Optimierung zu bestimmen. Dabei ist aufgrund der begrenzt möglichen mathematischen Formulierung der Zusammenhänge eine ganzheitliche Systembetrachtung nicht erfolgt. (Scholz 1998) stellt ebenfalls einen Ansatz vor, welcher sich auf eine reine Monetarisierung der Kriterien stützt.

(Meller und Jost 1998) und (Dirks und Meller 2000) bewerten zivile Flugzeuge anhand von drei Oberkriterien, deren Ausprägungen durch Kostenfunktionen abgebildet werden. Ob Gewichtungen berücksichtigt und wie diese ermittelt werden, lässt sich nicht aus den Ausführungen entnehmen. (Dožić und Kalić 2014) nutzten die Entscheidungstheorie, um eine Auswahl aus unterschiedlichen Luftfahrzeugen anhand weniger Kriterien (bspw. Sitzkapazität, Kosten, maximale Abflugmasse) zu treffen. Eine Bewertung von Passagierflugzeugen anhand einer Vielzahl von Kriterien wie *Kraftstoffffluss* (Fuel Flow), *Ausdauer*, *maximaler Reichweite*, *Steigleistung* und *Nutzlast* wurde von (Čokorilo et al. 2010) vorgenommen. Zusätzlich wurde eine Gewichtungsverteilung ermittelt und eine MCDA-Methode zur Ermittlung einer Rangfolge genutzt.

(Curran et al. 2010) entwickelt die *Value Operations Methodology* (VOM), welche auf dem *Analytical Hierarchy Prozess* (AHP) nach (Saaty 2008) beruht. Die Autoren entwickeln einen Kostenwert, welcher sich aus den Gewichtungen und den Differenzen der Kriterienausprägungen zweier Alternativen ergibt. Es werden vier Passagierflugzeuge verglichen, wobei sich die betrachteten Kriterien auf Kostenparameter (Lebenszykluskosten) und einfache, szenario-unabhängige Eigenschaften des Luftfahrzeuges wie bspw. *maximale Reichweite*, *Anzahl der Passagiere* oder *Schub/Gewichtsverhältnis* beziehen. Diese Methodik wurde ebenfalls von (Gkirgkis et al. 2017) mit dem Ziel der Entwicklung eines Ansatzes zur ganzheitlichen, objektiven Bewertung von operierenden Luftfahrzeugen genutzt. Die Autoren weisen zusätzlich auf die Beteiligung von Fachexperten hin und bestimmen den Konsens der Beteiligten bzgl. der Gewichtungsverteilung. Das Gesamtergebnis ergibt sich aus der Aufsummierung der Zwischenergebnisse, wodurch keine Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Kriterien betrachtet werden. Es werden weitestgehend die gleichen Bewertungskriterien wie bei (Curran et al. 2011) genutzt. Als ausgeführtes Beispiel wurde ein Vergleich zwischen einer Boeing B787-9 und einem Airbus A350-900 durchgeführt. Im Gesamtergebnis sind beide Versionen annähernd identisch, unterscheiden sich jedoch in verschiedenen Subkriterien, was bei den zwei betrachteten Kriterienebenen noch annähernd nachvollzogen werden kann, allerdings bei mehreren Ebenen nebulös bleibt. Ein identisches Vorgehen nutzen (Chang und Yeh 2001) zur Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit von Fluggesellschaften. Die Kriterien (*Kosten*, *Produktivität*, *Servicequalität*, *Ticketpreis* und *Management*) werden mit ihren Subkriterien ohne erkennbare Methodik gewichtet und anschließend mit MCDA- Methoden verrechnet. Die Ermittlung der Kriterienausprägungen erfolgt durch Firmendaten.

Ein weiteres Bewertungsmodell für verschiedene Konzepte der Flugzeugwartung wurde bei (Pozzetti 2015) vorgestellt, welcher zum Auffinden der besten Lösung *Fuzzy* Mengen ähnlich (Durst et al. 2014) nutzt. Es werden Bewertungskriterien in drei Kategorien (*Verfügbarkeit*, *Instandhaltbarkeit*, *Instandhaltungsvermögen*) formuliert und deren Quantifizierung aufgezeigt, wobei die Definition der Unschärferegeln nicht näher erläutert wird. Die Ableitung der Bewertungskriterien sowie deren Gewichtungen werden nicht deutlich, wobei letztere überhaupt nicht berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Ausprägungen werden reelle Daten genutzt (Pozzetti et al. 2010), welche später zur Ableitung von leistungsbezogenen Wartungszyklen berücksichtigt werden. Eine Kriterienhierarchie für die Bewertung von Wartungskonzepten wird in (Rodríguez-Padial et al. 2015) aufgestellt, welche weiterführend mit multikriteriellen entscheidungstheoretischen Methoden verrechnet und mit einer Sensitivitätsanalyse überprüft werden. (Zhang et al. 2011) nutzt eine allgemeine Kostenfunktion, um durch Monetarisierung der Ausprägungen ein Bewertungsergebnis zu erzielen und eine Handlungsanweisung für Wartungsarbeiten abzuleiten. Ein ähnliches Vorgehen nutzen (Weckman et al. 2006) zur Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung bei der Triebwerkswartung oder (Scanlan et al. 2006) zur Auswahl einer Gasturbine im Entwurfsprozess. Sie modellieren Kostenfunktionen, welche als einziges ökonomisches Kriterium für die Technologieauswahl oder für Optimierungsvorhaben betrachtet werden.

Der Vergleich der betrachteten Ansätze mit den abgeleiteten Konzeptanforderungen ist in Tabelle 1 anschaulich verdeutlicht. Die Nummerierung der konzeptionellen Anforderungen wurde aus Kapitel 2.3.2 übernommen.

Autor	Gegenstand	Anforderungen													
		Verbindung	Ganzheitlich	Korrelation	Expertenwissen	Wertvorstellung ET	Strukturierung	Plausibilität	Nachvollziehbarkeit	Robustheit	Abhängigkeiten	Methodik	Objektivität	Multikriteriell	Optimierung
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	5.3	UC
(Milan 2010) (Milan 1993) (Scholz 1998)	allgemeine Transport-systeme	ka	-	-	ka	+	o	-	ka	+	+	ka	o	-	ka
(Meller und Jost 1998) (Dirks und Meller 2000)	zivile Flug-zeuge	-	-	-	ka	+	o	o	ka	-	-	-	ka	-	-
(Dožić und Kalić 2014)		o	o	-	-	o	o	-	ka	+	+	-	-	-	ka
(Čokorilo et al. 2010)		-	o	-	ka	+	o	o	ka	o	-	-	o	-	-
(Gkirgkis et al. 2017)	Passagier-flugzeuge	o	o	-	+	+	o	+	ka	+	-	o	-	o	ka
(Curran et al. 2010) (Curran et al. 2011)		o	o	ka	o	+	o	o	ka	-	o	o	-	-	-
(Chang und Yeh 2001)	Fluggesell-schaften	ka	o	-	ka	o	o	-	ka	+	-	ka	o	-	ka
(Pozzetti et al. 2014) (Pozzetti 2015)	militärische „*multi-mis-sion*“ Plattformen	-	o	ka	-	-	o	ka	ka	-	-	-	+	ka	-
(Rodríguez-Padial et al. 2015)	Wartungs-konzepte	o	-	ka	+	o	o	o	ka	+	+	-	+	ka	-
(Weckman et al. 2006) (Scanlan et al. 2006)	Triebwerks-auswahl	-	o	-	+	-	o	-	ka	-	-	-	ka	ka	-

Tabelle 1: Bewertungsmodelle für bemannte fliegende Plattformen. *Aufführung der entwickelten bzw. realisierten Bewertungsverfahren für die Bewertung und den Vergleich von bemannten Luftfahrzeugen. (+: erfüllt, -: nicht erfüllt, o: teilweise erfüllt, ka: keine Aussage möglich)*

3.1.2 Modelle zur Bewertung von unbemannten fliegenden Plattformen

Es wurde eine Vielzahl an Anstrengungen unternommen, um speziell die Autonomie bzw. den Autonomiegrad unbemannter Plattformen zu bewerten, um daraus Fähigkeiten bzw. Leistungssteigerungen abzuleiten. Besonders im militärischen Bereich wurde versucht, eine Bewertungssystematik einzuführen, um unterschiedliche UAV vergleichen und bewerten zu können. Dazu wurde von (Huang et al. 2005a; Huang et al. 2005b) ein Verfahren entwickelt, welches zur Ableitung von Autonomiestufen unterschiedliche Kriterien und deren Ausprägungen kombiniert. Dieses *Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework* (ALFUS) beinhaltet ein detailliertes und ein allgemeines Model zur Bestimmung des Autonomiegrades. Das detaillierte Model nutzt ein System aus drei Top-Level Kriterien (Komplexität der Mission, Komplexität der Umgebung, menschliche Abhängigkeiten), deren Ausprägungen in realen Feldtests gemessen, allerdings nicht mathematisch kombiniert werden. Das allgemeine Modell bestimmt den Autonomiegrad über vorgefertigte Stufen zwischen 0 und 10. Das ALFUS nimmt dabei keine Dekomposition von Kriterien vor und formuliert keine Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen.

Zur Ableitung einer Systembewertung ohne die aufwändige Durchführung von Feldversuchen wurde das *Non-Contextual Autonomy Potential* (NCAP) von (Durst et al. 2013) entwickelt. Dieses Verfahren stellt ein Vorgehen zum Abschätzen der autonomen Leistungsfähigkeit als auch für deren Bewertung bereit, allerdings ohne Berücksichtigung einer zugrundeliegenden Mission. Der schlussendlich ermittelte Erfüllungsgrad soll ein Indikator für die Fähigkeit der betrachteten Plattform sein. Dabei wird keine Ableitung des Erfüllungspotentials für eine Mission durchgeführt oder die Auswirkung der Autonomiegrade auf das Erfüllungspotential betrachtet. Darauf aufbauend wurde im Rahmen einer internationalen Forschergruppe[47] eine Methodik zur Ermittlung eines missionsabhängigen Potentials von (Durst et al. 2014; Trentini und Dietrich 2016) entwickelt. Es wurde ein *Mission Performance Potential* (MPP) ermittelt, welches als Erfüllungspotential einer Mission verstanden und zur Bewertung verschiedener Plattformen genutzt werden kann. Es wird eine Auswahl an unterschiedlichen Kriterien inklusive deren Gewichtungen betrachtet, welche anschließend über eine Fuzzy Logik in das Systempotential überführt werden. Über die Ableitung der Kriterien, deren Quantifizierung und Abhängigkeit sowie der Definition der Gewichtungen und der Fuzzy-Sets machen die Autoren keine genaueren Angaben.

(Mavris et al. 1999) vergleicht unbemannte Kampfflugzeuge (UCAV) mit der *Technology Impact Forecasting* Methode. Neben einfachen Flugleistungskriterien werden Gewichte und Kosten betrachtet, um mit einer Sensitivitätsanalyse die Einflüsse der einzelnen Kriterien zu prüfen. Als Ergebnis werden einzelne Konfigurationen (Variation von Gewicht oder Kosten) verglichen und deren Verbesserung bzw. Verschlechterung hinsichtlich einer Referenzkonfiguration ermittelt.

Neben den fokussierten Bewertungen spezieller Technologien oder Fähigkeiten wurden auch missionsorientierte Bewertungen durchgeführt. So hat (Shilin et al. 2017) vier verschiedene, marktverfügbare UAVs zur Pestizidbekämpfung bewertet. Es wurden einzelne Kriterien definiert wie bspw. die *besprühte*

[47] NATO STO (Science and Technology Organization) AVT-175

Fläche oder die *Ausfallraten*. Neben der Durchführung einer Machbarkeitsstudie sollten die Systeme auch bewertet werden, was allerdings über die reine Ausprägungsermittlung der Kriterien nicht hinausging.

Autor	Gegenstand	Anforderungen													
		Verbindung	Ganzheitlich	Korrelation	Expertenwissen	Wertvorstellung ET	Strukturierung	Plausibilität	Nachvollziehbarkeit	Robustheit	Abhängigkeiten	Methodik	Objektivität	Multikriteriell	Optimierung
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	5.3	UC
(Huang et al. 2005a) (Huang et al. 2005b)	Autonomie-bewertung	-	o	-	+	-	o	-	ka	o	-	-	+	-	-
(Durst et al. 2013)		-	+	ka	+	-	+	-	ka	-	-	o	-	-	ka
(Durst et al. 2014) (Trentini und Dietrich 2016)	Autonomie von UAV	o	+	ka	+	-	+	+	ka	-	o	o	o	ka	-
(Mavris et al. 1999)	Unbemannte Kampfflug-zeuge	o	ka	o	+	-	+	o	ka	+	+	-	o	-	+
(Shilin et al. 2017)	UAVs zur Pestizidbe-kämpfung	o	o	-	+	-	o		ka	-	-	-	o	-	-
(Boon et al. 2006)	UAVs für Kartierungs-aufgaben	o	o	-	-	-	+	-	ka	-	-	-	+	-	-
(Boccardo et al. 2015)		o	ka	-	-	-	o	-	ka	-	-	-	+	-	-
(Kouhestani et al. 2017)	Technologie-bewertung zur UAV-Abwehr (CUAS)	o	ka	-	-	-	o	-	ka	-	-	-	o	-	ka

Tabelle 2: Bewertungsmodelle für den Bereich der unbemannten fliegenden Plattformen. *Aufführung der entwickelten bzw. realisierten Bewertungsverfahren für die Bewertung und den Vergleich von unbemannten Plattformen. (+: erfüllt, -: nicht erfüllt, o: teilweise erfüllt, ka: keine Aussage möglich)*

(Boon et al. 2006) vergleichen ein Flächen- und ein Rotor-UAV – ausgestattet mit identischen Sensoren (digitale RGB Kamera) – hinsichtlich deren Eignung zur Durchführung von Bodenkartierungsaufgaben.

Dazu führen die Autoren Feldversuche durch und ermitteln damit die Ausprägungen weniger Bewertungskriterien, welche weiterführend allerdings nicht zu einem Gesamtergebnis aggregiert werden.

(Boccardo et al. 2015) bewerten ebenfalls UAVs für deren Einsatz bei Umweltkatastrophen, speziell hinsichtlich der Fähigkeit zur Bodenkartierung. Dabei werden ebenfalls mit Feldversuchen die Ausprägungen der Kriterien wie bspw. verarbeitete Bilder, die Bodenauflösung (*Ground Sample Distance*) oder Verarbeitungszeit ermittelt, allerdings ebenfalls nicht weiter entscheidungstheoretisch behandelt. Es lassen sich weitere aufgabenspezifische Bewertungen und Vergleiche von UAVs finden, welche sich allerdings nicht merklich von den bereits vorgestellten Vorgehen unterscheiden.

Neben den Ansätzen zur Bewertung unbemannter Plattformen werden ebenfalls Vorgehen postuliert, welche sich mit der Bewertung von Technologien zur Abwehr von UAVs beschäftigen. Obwohl dabei nicht direkt die Bewertung der Plattform im Fokus steht, soll dennoch ein Ansatz aufgeführt werden. So bewerten (Kouhestani et al. 2017) die Fähigkeiten zum Identifizieren und Neutralisieren von UAVs. Dazu berücksichtigen die Autoren Kriterien wie bspw. die *Entdeckungswahrscheinlichkeit*, das *Suchvolumen* des Sensors oder die *Erfassungszeit*, welche ebenfalls bei Aufklärungsplattformen relevant sind. Allerdings werden die Ausprägungen nicht mathematisch miteinander verrechnet. Weitere Bewertungen, welche sich nicht auf das System sondern bspw. auf dessen Akzeptanz seitens der Operateure beziehen, sollen hier nicht betrachtet werden. Ein solches Beispiel wäre die Bewertung der Nutzerakzeptanz von UAVs im Katastrophenschutz von (Hermanns 2013).

3.1.3 Ansätze für Entscheidungsunterstützungssysteme in der Luftfahrt

Eine Übersicht über die Vielzahl der DSS aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen lässt sich u.a. bei (Eom und Lee 1990; Er 1988; Burstein und Holsapple 2008) finden. Abbildung 11 zeigt die Verteilung von Expertensystemen in einzelnen Anwendungsgebieten. Es ist deutlich zu erkennen, dass für den Bereich der Luftfahrt bisher die wenigsten Anstrengungen unternommen wurden. In dem folgenden Abschnitt sollen dennoch nur diejenigen Unterstützungssysteme genannt und aufgezeigt werden, welche für den Bereich der Luftfahrt umgesetzt wurden. Die Gegenüberstellung mit den Konzeptanforderungen ist in Tabelle 3 aufgeführt.

(Gollnick et al. 2011) schlägt zur Optimierung von Transportsystemen und damit auch für deren Bewertung eine Methode namens *Virtual Integration Platform* (VIP) vor, welche neben dem Luftfahrzeug selbst bspw. die notwendige Infrastruktur (Landebahn, Terminal) und den Luftraum (Flugverkehr) enthält sowie als integrierte Entwicklungsumgebung für zukünftige Transportflugzeuge beschrieben wird. Das DSS wurde in gemeinschaftlicher Zusammenarbeit mit (Bohnke et al. 2011) implementiert und die Beschreibung der Konfigurationen wurde mit CPACS[48] (*Common Parametric Aircraft Configuration Standard*)

[48] CPACS ist eine mit Python implementierte Modellierungssprache für den Flugzeugentwurf (http://cpacs.de/; zuletzt besucht am 02.09.2018)

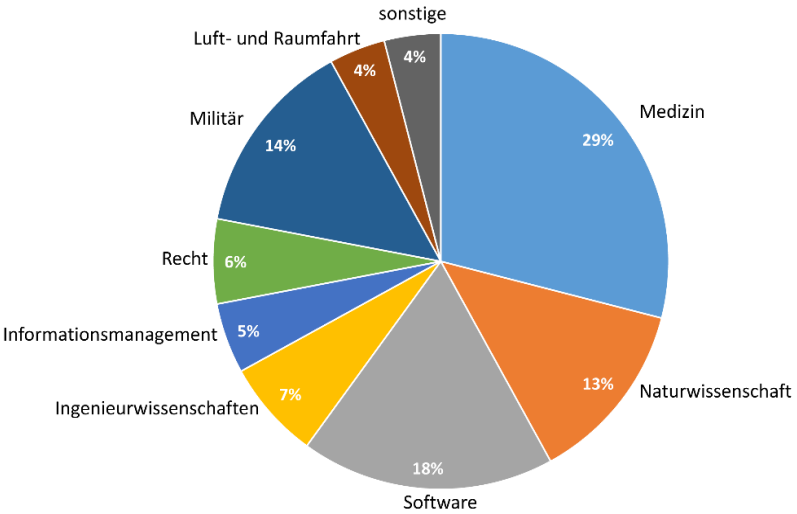


Abbildung 11: Verteilung von Expertensystemen in den einzelnen Anwendungsgebieten (Waterman 1993). *Der Bereich der Luft- und Raumfahrt macht den kleinsten Bereich der entwickelten Expertensysteme aus.*

realisiert. Dadurch können einzelne Substrukturen betrachtet und ggf. optimiert, jedoch eine transparente und missionsorientierte Bewertung nicht durchgeführt werden. Weiterhin beschreiben die Autoren, dass die Auswahl des Zielsystems durch ein „gutes" Gefühl des ET gestützt sein soll. Das Aufstellen des Zielsystems basiert daher mehr auf Intuition als auf einem methodischen Vorgehen. Weiterführend wird keine methodische, mathematische Berechnung des Bewertungsergebnisses durchgeführt, da diese nach Meinung der Autoren bei revolutionären und futuristischen Konfigurationen zu falschen Ergebnissen führen.

Ein holistischer Ansatz für ein DSS zur Bewertung von Transportflugzeugen wurde von (Langhans et al. 2008) postuliert, welcher das Flugzeug im Zusammenhang mit Flughafen und Luftverkehrssystem (*Air Traffic System*) betrachtet. Der ausschließlich theoretische, nicht implementierte und validierte Bewertungsprozess wurde von dem allgemeinen Problemlösungsprozess des *Systems Engineering*[49] abgeleitet und durch den Autor nicht weiter spezifiziert. (Stumpf et al. 2011) stellen darauf aufbauend ebenfalls einen theoretischen Ansatz für ein DSS zur Bewertung von Transportsystemen vor. Dessen Zielsetzung ist die Bewertung des Beitrags einzelner Technologien zur Erreichung abstrakter übergeordneter Anforderungen für zukünftige Transportsysteme. Dazu wurde eine Analyseumgebung (*DLR air transportation system analysis*) entwickelt. Mit dem entwickelten Vorgehen können mono (Monetarisierung)- und multikriterielle Bewertungen durchgeführt werden. Das Gesamtergebnis wird in Form eines Indexes ausgegeben (*Social-Eco-Efficiency-Index*, SEEindex). Dieser wurde von (Weiss et al. 2011) entwickelt, aus der Aggregation verschiedener Kriterien (wirtschaftlich, ökologisch, gesellschaftlich) unter Zuhilfenahme einer MCDA- Methode berechnet und in den bestehenden Prozess integriert. Soweit ersichtlich, wurden dabei keine Präferenzen erfasst. Weiterhin wird nicht deutlich, wie das Zielsystem ausgehend von der Nutzenabsicht abgeleitet wird.

[49] Vgl. (Jackson 2015)

(Li et al. 2016) entwickelten ein agiles DSS (*Agile Decision Support System*, ADSS) für den Flugzeugentwurf mit der Integration von Berechnungsmodellen, künstlicher Intelligenz, Datenspeicherung und entscheidungstheoretischen Elementen. Das ADSS stellt Simulations-, Bewertungs- und Optimierungswerkzeuge bereit, welche laut der Autoren zur Verbesserung der Entscheidungsgenauigkeit führen sollen. Unterschiedliche Designs sollen mit Hilfe einer Testumgebung bewertet und verglichen werden können. Die Architektur besteht aus drei Schichten, wobei die untere Schicht die Ressourcen (Algorithmen, Software, Daten aus vorangegangenen Entscheidungen) und die obere Schicht eine grafische Ausgabefläche beinhaltet. Die mittlere Schicht enthält die Entscheidungsunterstützungsumgebung bestehend bspw. aus Managementmodulen zur Wissensverteilung, zum Arbeitsgruppenmanagement, zur Audiokommunikation zwischen den Beteiligten und entscheidungstheoretischen Modellen. Soweit ersichtlich, stellt die Architektur eine umfangreiche Sammlung von Werkzeugen zum Auffinden von schnellen Gruppenentscheidungslösungen im Entwurfsprozess dar, jedoch bleiben dabei die Methodik sowie die Durchführung der einzelnen Schritte unklar. Das Vorgehen verwendet – soweit aus den Ausführungen ersichtlich – große Anstrengungen darauf, optimale geometrische Parameter der Konfiguration zu ermitteln. Missionsorientierte Betrachtungen der Fähigkeiten und der zugehörigen Zielsysteme sowie die Transparenz und Reproduzierbarkeit des Prozesses und der Ergebnisse werden nicht thematisiert. Im Wesentlichen ist diese agile Methode weniger planungsbezogen und kohärent, sondern mehr iterativ ausgerichtet.

Eine weitere Methodik zur Bewertung neuartiger Technologien kommerzieller Flugzeuge in frühen Entwurfsstadien ist die *Technology Identification, Evaluation and Selection* Methode (TIES) von (Mavris und Kirby 1999). Die neunstufige Methodik setzt sich zum Ziel, umsetzbare Alternativen im gesamten Entwurfsraum während des Entwurfsprozesses zu finden und ist vorwiegend für den Designer bestimmt. Zur Ermittlung der Ausprägungen bewertungsrelevanter Kriterien werden mehrere wahrscheinlichkeitsbasierte Berechnungsmodule genutzt. Neben *Monte-Carlo* Simulationen werden Regressionsgleichungen (*Surface Response Equations*) genutzt (Mavris und DeLaurentis 1997; Mavris et al. 1998; Mavris et al. 1996; DeLaurentis et al. 1996), um die Vielzahl an unterschiedlichen Kombination zu berechnen. Soweit ersichtlich, werden vorwiegend Kriterien der Flugleistung sowie Geometrie (Flügelfläche), Aerodynamik (L/D) und Triebwerk (SFC) betrachtet. Die Methodik ist auf die Ermittlung neuer, möglicher Technologien bei Transportsystemen fokussiert, gleichwohl ist auch eine Bewertung der unterschiedlichen Alternativen (Technologien) vorgesehen. Diese wird mit Hilfe einer MCDA- Methode durchgeführt, wobei das zugrundeliegende Zielsystem nicht näher erläutert wird.

TIES wurde durch (Kirby und Mavris 1999) mit der Zielsetzung weiterentwickelt, die Quantifizierung der Ungenauigkeiten zukünftiger Technologien zu verbessern und eine robuste Bewertung der möglichen Technologien/Konfigurationen durchzuführen. In der so entstandenen *Technology Impact Forecasting* Methode (TIF) wird die Kompatibilität einzelner Technologien in einer Matrix mit *„integrierten Produktteams“* definiert, wobei immer nur zwei Technologien miteinander kombiniert werden können. Diese Technologien werden anschließend anhand eines Zielsystems bewertet. Abgesehen von den Bemühungen, die Auswirkung zukünftiger Technologien vorauszusagen, wurden keine Anstrengungen für deren nachvollziehbare und reproduzierbare Bewertung unternommen. Die Robustheit des Bewertungsergebnisses wird mit der *Robust Design Simulation* Methode (Mavris und DeLaurentis 1997; Mavris und Roth 1997) ermittelt. Die Nutzenabsicht wird dabei nicht genau definiert und es findet auch keine transparente

Ableitung der Kriterien statt. Mit diesem Vorgehen lassen sich zwar die Einflüsse verschiedener Technologien auf die Anforderungen bestimmen, jedoch werden die Ableitung des Zielsystems und die Wechselwirkung der Kriterien nicht näher betrachtet.

Ein weiteres DSS zur Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme für den Flugzeugentwurf und den allgemeinen Systemvergleich wurde von (Bandte 2000) vorgeschlagen. Aufgrund der Unsicherheiten in frühen Entwurfsstadien nutzt der Autor Entscheidungsmethoden mit wahrscheinlichkeitsbasierten Dichtefunktionen (*Probability Density Function*), mit denen er eine Erfüllungswahrscheinlichkeit (*Probability of Success*) berechnet. Diese Dichtefunktionen weisen allerdings laut (Yongchang Li et al. 2004) erhebliche Nachteile und Ungenauigkeiten bei der Betrachtung von multikriteriellen Problemen auf, so dass diese impraktikabel für die Systembewertung sind. (Yongchang Li et al. 2004; Sun et al. 2011) nutzen deshalb sogenannte Verlustfunktionen (*Loss Function*) zur Quantifizierung der Kriterien. Diese messen die Abweichung und Schwankung des Kriteriums von dessen optimalen Zustand und ermitteln daraus einen entsprechenden Verlust. Allerdings wird kein DSS vorgestellt, sondern lediglich eine modifizierte Methode der wahrscheinlichkeitsbasierten, multikriteriellen Entscheidungstheorie. (Sun et al. 2011) erweitern dieses Vorgehen um eine Sensitivitätsanalyse zur Überprüfung der Robustheit der Lösung.

(Chen et al. 1998) stellt ebenfalls ein DSS vor, welches eine Hierarchie von Kriterien betrachtet, diese quantifiziert und mit den Lebenszykluskosten verrechnet. Die Ausprägungen der sechs Kriterien werden auf einer 10-Punkte Verhältnisskala ermittelt und anschließend normalisiert. Weiterhin werden Gewichtungen berücksichtigt und die Auswahl der besten Lösung findet mit einer direkten Gewichtungsmethode (*Simple Additive Weighting*, SAW) am Beispiel der Bewertung von vier zivilen Flugzeugen statt.

Ein weiteres Unterstützungssystem für Designentscheidungen wird von (Sun 2014; Sun et al. 2012) vorgestellt. Unter der Nutzung von MCDA- Methoden werden Alternativen für eine spätere Optimierung bewertet. Der Ansatz berücksichtigt subjektive Einflüsse von ET und vier Kriterien (*Leermasse*, *Kraftstoffmasse*, *Passagierdichte* und *Blockstunden*) für die Bewertung. Bei der anschließenden Optimierung werden die Gewichtungen variiert und die Auswirkungen auf das Ergebnis betrachtet. Dieser Ansatz dient laut den Autoren zur Ermittlung der Präferenzen des ET.

Ein weiteres Unterstützungssystem für die Abfertigung von Flugzeugen wurde von (Koornneef et al. 2017) vorgestellt. Es werden Einflüsse wie der *Flugzeugstatus* (Wartung), die *Verfügbarkeit*, *Lufttüchtigkeitsvorschriften* und *operationelle Präferenzen* des Betreibers berücksichtigt. Es wird eine Kriterienhierarchie inklusive Gewichtungen betrachtet, um unterschiedliche Alternativen in eine Rangfolge zu bringen. Die Autoren führen allerdings weder die Kriterien noch die Gewichtungen in ihrer Arbeit auf. Die Entscheidung wird automatisiert mit einem geringen Zeitansatz getroffen, so dass eine Beteiligung von entsprechenden Fachleuten zur Identifikation von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen nicht vorgesehen ist.

(Choi et al. 2018) stellen einen Ansatz zur Bewertung der Erfüllung von UAV- Aufklärungsmissionen vor, welcher eine Kombination aus Plattform, Missionssensorik und dem Piloten betrachtet, um ausgehend von diesen Daten eine optimale Konfiguration abzuleiten. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Optimierung der Trajektorien gelegt, um auf Basis einer geforderten Bodenauflösung (GSD, *Ground Sampling Distance*) die Flughöhe und den Flugweg zeitoptimiert anzupassen. Diese Daten (Flugzeit und

GSD) werden genutzt, um in Verbindung mit einfachen Kriterien bzgl. der Fähigkeiten des Piloten eine Systemauswahl in Form einer Rangfolge mit Methoden der Mehrfachzielentscheidung abzuleiten. Die Ableitung der Gewichtungsverteilung erfolgt auf Basis der Missionsanforderungen. Eine Betrachtung über diese genannten Kriterien hinaus erfolgt nicht. Der Ansatz wird vorwiegend dazu genutzt, um ausgehend von verschiedenen Plattformen, Sensoren und Piloten mögliche Kombinationen zu generieren. Der Ansatz strebt eine automatische Ergebnisgenerierung an, so dass der Anspruch einer Ergebnisermittlung auf unterschiedlichen Detailebenen sowie die Unterstützung eines ET nicht gestellt und damit auch nicht verfolgt wird.

Autor	**Gegenstand**	**Anforderungen**													
		Verbindung	Ganzheitlich	Korrelation	Expertenwissen	Wertvorstellung ET	Strukturierung	Plausibilität	Nachvollziehbarkeit	Robustheit	Abhängigkeiten	Methodik	Objektivität	Multikriteriell	Optimierung
		1.1	**1.2**	**1.3**	**1.4**	**1.5**	**2.1**	**3.1**	**3.2**	**4.1**	**4.2**	**5.1**	**5.2**	**5.3**	**UC**
(Gollnick et al. 2011) (Bohnke et al. 2011)		+	+	-	o	-	o	o	ka	-	-	-	o	o	o
(Langhans et al. 2008)	Transport-flugzeuge	o	o	-	+	o	o	-	ka	-	o	-	o	o	o
(Stumpf et al. 2011) (Weiss et al. 2011)		+	+	o	+	+	o	o	ka	o	o	o	o	-	-
(Li et al. 2016)	Agiles DSS für den Flugzeug-entwurf	-	ka	ka	+	+	o	-	ka	+	+	-	+	ka	+
(Kirby und Mavris 1999) (Mavris und Kirby 1999)	Ableitung von Tech-nologien und Konfi-gurationen (TIES)	o	+	o	+	-	o	-	ka	+	+	-	+	-	+
(Mavris et al. 2011) (Mavris et al. 1998)		o	o	o	o	-	o	-	ka	+	+	ka	+	-	+

(Bandte 2000) (Yongchang Li et al. 2004)	wahrscheinlichkeitsbasierte Bewertung im Entwurfsprozess	ka	+	-	+	+	o	-	ka	+	+	ka	ka	-	-
(Chen et al. 1998)	Bewertung ziviler Luftfahrzeuge	o	o	-	+	ka	o	o	ka	-	-	ka	o	-	-
(Sun et al. 2014)	Entwurfsprozess	ka	ka	-	+		o	-	ka	+		ka	ka	-	-
(Koornneef et al. 2017)	Flugzeugabfertigung	o		o			o	-	ka	-		-	+	-	+
(Choi et al. 2018)	UAV für Aufklärungsmission	o	-	-	-	o	o	o	o	-	-	ka	+	-	o

Tabelle 3: Überblick über Entscheidungsunterstützungssysteme in der Luftfahrt. *Aufführung der entwickelten bzw. realisierten DSS für die Bewertung und den Vergleich von unterschiedlichen Luftfahrzeugen. (+: erfüllt, -: nicht erfüllt, o: teilweise erfüllt, ka: keine Aussage möglich)*

3.2 Eingesetzte Kompensatorische Verfahren

Dieses Kapitel soll die genutzten MCDA-Methoden aus den obigen Arbeiten – sofern entsprechende Methoden Anwendung gefunden haben – noch einmal einzeln aufführen. In einem späteren Kapitel (siehe Kapitel 4.3.2) werden diese Methoden hinsichtlich deren Eignung für diese Arbeit bewertet.

Das Ziel dieser Multikriteriellen Methoden ist, den ET dabei zu unterstützen, die zur Verfügung stehenden Alternativen zu sortieren oder eine Rangfolge zu bilden (Oberschmidt et al. 2009). Die Hauptaufgabe der verschiedenen Ansätze der multikriteriellen Entscheidungstheorie besteht darin, die Schwierigkeiten menschlicher ET mit einer großen Menge an komplexen Informationen (siehe Kapitel 2.2) konsistent zu behandeln. Der Wert der Methoden liegt in der schrittweisen Aufgliederung komplexer Entscheidungsprobleme, so dass der ET nicht mehr ein komplexes Gesamtproblem zu lösen, sondern mehrere Einzelschritte zu bearbeiten hat. Grundsätzlich wird zwischen zwei Gruppen multikriterieller Methoden differenziert (Figueira et al. 2005):

- *Multi-Attribut-Verfahren (Multi Attribut Decision Making – MADM), „bei denen die zur Verfügung stehenden Alternativen vorab bekannt sind und eine Kategorisierung oder Rangfolge der Technologien“* (Oberschmidt et al. 2009) gebildet werden (diskrete Lösungsräume).
- *Multi-Objective-Verfahren (Multi Objective Decision Making – MODM), „bei denen die Alternativen nicht vorab bekannt sind, sondern innerhalb eines kontinuierlichen Lösungsraumes liegen, der durch Randbedingungen definiert ist“* (Oberschmidt et al. 2009). Im Rahmen der Lösungsfindung wird die optimale Lösung mit Hilfe von Vektoroptimierungsmodellen berechnet oder eine Lösung ermittelt, welche der optimalen Lösung am nächsten ist (stetige Lösungsräume).

„*Bestimmte MODM- Verfahren eignen sich auch zur Auswahl diskreter Alternativen*“ (Ruhland 2004). Dazu werden abstandsorientierte Vorgehen genutzt, welche in einem stetigen Lösungsraum den minimalen Abstand zu einer vorgegebenen idealen Lösung berechnen (Ruhland 2004). Als Zielfunktion kann dabei ein Abstandsmaß (bspw. *Euklidische Distanz* oder *Manhatten Distanz*) des Lösungsvektors vom vorgegebenen Zielvektor verwendet werden (Mendoza und Martins 2006). Bei diesen Verfahren sind für jedes Kriterium Idealpunkte vorzugeben, was bei wahrscheinlichkeitsbasierten Kriterienausprägungen einfach, allerdings bei kontinuierlichen Werten schwer zu realisieren ist. So lässt sich bspw. der optimale Wert für die *Aufklärungsleistung* mit 100% definieren, während die *Wenderate* oder die *Bodenauflösung* keinen direkten Zielwert hat. Die Definition solcher Idealwerte ist für eine Vielzahl metrischer Größen nicht durchführbar, so dass die MODM-Verfahren nicht weiter verfolgt werden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die zu bewertenden Luftfahrzeuge diskret, d.h. bekannt sind.

In Abbildung 12 ist ein Überblick über ausgewählte Verfahren der Multikriteriellen Entscheidungstheorie (*Multi Criteria Decision Analysis*, MCDA) gegeben. Wie bereits erwähnt, sind die MODM- Verfahren sowie die nicht-kompensatorischen MADM- Verfahren für die Bewertungsaufgabe dieser Arbeit nicht geeignet und sollen deshalb auch im Folgenden nicht näher erläutert werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher auf die Vorstellung ausgewählter *kompensatorischer* MADM- Methoden.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl qualitativer Methoden zur Entscheidungsunterstützung wie *ordinale Paarvergleiche*, welche sehr einfach zu implementieren sind und eine Rangfolge auf Basis subjektiver

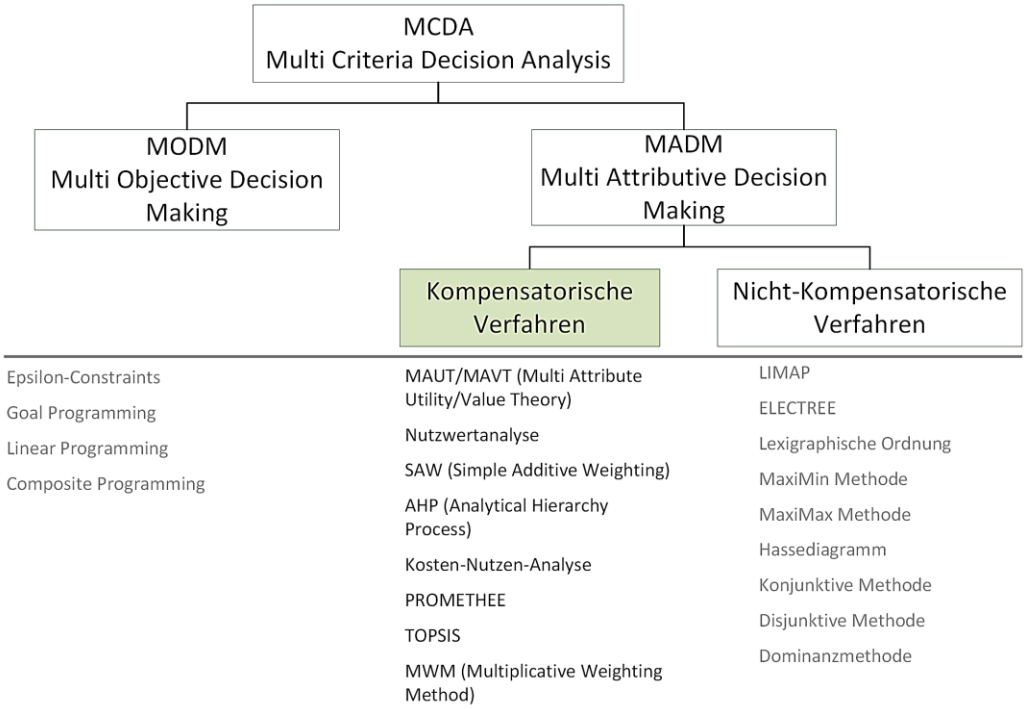


Abbildung 12: Taxonomie ausgewählter Methoden der Multikriteriellen Entscheidungstheorie (mod. nach (Rolander et al. 2004) und (Ruhland 2004)). *Die Kompensatorischen Methoden beinhalten die notwendigen Fähigkeiten, welche zur Bewertung luftgestützter Plattformen notwendig sind. Die MODM- Verfahren sowie die Nicht-Kompensatorischen MADM-Verfahren sind nicht geeignet (graue Schrift).*

Werte ableiten. Tabelle 4 gibt einen Überblick bzgl. der angewandten *kompensatorischen* Bewertungsmethoden in der Luftfahrt.

Im Allgemeinen reduzieren die rein qualitativen Auswahlmethoden wie die *Pugh-Matrix* das Problem systematisch auf leicht verständliche Präferenzen (King und Sivaloganathan 1999). Diese qualitativen Methoden finden eine verbreitete Anwendung speziell bei Bewertungen im Vorentwurf (Curran et al. 2010; Li et al. 2005). Während früher Designphasen können Intuition und fachspezifisches Wissen der Entwickler wertvolle Einblicke in die Fähigkeiten des Konzeptes liefern, da sie schnellere und teilweise auch genauere Lösungen bieten können als anspruchsvollere Designmethoden (Frost 1999). Wegen des hohen Risikos für ein Unternehmen, revolutionäre Konzepte oder Ideen zu verfolgen, sind viele Entwürfe evolutionäre oder inkrementelle Änderungen bewährter Konzepte (Frost 1999). Dabei kommt der Erfahrung des Ingenieurs eine höhere Bedeutung zu als dem strukturierten Ableiten einer Entscheidung anhand eines Bewertungsergebnisses. Daher werden diese einfachen und subjektiven Methoden bevorzugt in realen Designproblemen eingesetzt (Eder 1998). Für alle Vorteile der qualitativen Auswahlmethoden gibt es einige schwerwiegende Nachteile, speziell für den Einsatz bei der ganzheitlichen Bewertung luftgestützter Systeme. Diese Methoden weisen eine geringe bis gar keine mathematische Vorgehensweise und Ergebnisbestimmung auf. Die Ergebnisse sind nicht reproduzierbar und können auch durch den ET selbst nicht nachvollzogen werden.

Zur Berechnung des *Potentials eines Luftfahrzeuges zur Erfüllung einer Mission* (siehe Zielsetzung in Kapitel 1.1) ist es notwendig, dass numerische Werte oder tatsächliche Leistungen auf beliebigen Messskalen abgebildet werden (Otto 1995), was speziell von den gewichteten Entscheidungsmatrizen ermöglicht wird. Die auf diesen Entscheidungsmatrizen basierten qualitativen Methoden wie bspw. die *Nutzwertanalyse* oder der *Analytische Hierarchieprozess* (AHP) gehören zu den klassischen Methoden der Mehrfachzielentscheidung. Die Vorteile sind die gut nachvollziehbare Logik sowie die einfache Umsetzung.

> *„Die Ermittlung der einzelnen Nutzenfunktionen ist hierbei jedoch entweder mit einem großen Datenermittlungsaufwand verbunden oder die Präferenzen des Entscheiders werden zu stark vereinfacht dargestellt, sodass eine exakte und korrekte Abbildung oft nicht gewährleistet ist.“*
>
> (Geldermann 2014)

In diesem Zusammenhang ist auch die Annahme, dass sich der Entscheider stets seiner Präferenzen bewusst ist und diese korrekt wiedergeben kann, fraglich. *„Zudem ist die Bedingung, dass die Kriterien voneinander unabhängig sein müssen, in der Realität nur schwer umzusetzen“* (Geldermann 2014).

Neben den klassischen Verfahren existiert die Gruppe der Outranking- Methoden, welche ihren Ursprung in den Kritikpunkten ebendieser klassischen Verfahren begründen. *„So basieren die Outranking-Methoden auf der Annahme, dass der ET nicht eindeutig um seine eigenen Präferenzen weiß und diese daher nicht exakt abbilden“* (Geldermann 2014) bzw. verbalisieren kann. Sie erlauben auch die Berücksichtigung widersprüchlicher Informationen. Die Vorteile der Outranking- Methoden wie bspw. *Promethee* oder *Electre* liegen in der erweiterten Berücksichtigung von Wertvorstellungen sowie den damit verbundenen Unvergleichbarkeiten, der nachvollziehbaren Anwendung sowie der Vermeidung einer

möglichen vollständigen Kompensation bezüglich der Kriterienausprägungen (Figueira et al. 2005; Geldermann 2014). Zudem spiegeln diese die zugrundeliegenden Annahmen die Realität adäquat wieder. Mit den individuellen Präferenzfunktionen können auch schwache Präferenzen und Unvergleichbarkeiten dargestellt werden. Diese Möglichkeit ist besonders wertvoll, wenn eine Vielzahl an Kriterien vorliegt, da in diesem Fall die Annahme der klassischen Verfahren – für die einzelnen Alternativen eine strikte Präferenz angeben zu können – fraglich ist (Geldermann 2014).

Aus Tabelle 4 wird deutlich, dass unterschiedliche Methoden bei nahezu gleichen Anwendungsbereichen genutzt werden. So nutzt bspw. (Mello et al. 2012) für die Bewertung von Flugzeugkonzepten die Methode *Promethee*, während bei (Sun 2014) und (Kirby und Mavris 1999) die Methode *Topsis* Anwendung findet. Für eine genaue Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der einzelnen MCDA- Methoden sei an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen. Eine domänenübergreifende Auflistung der MCDA- Methoden in unterschiedlichen Anwendungsbereichen ist ebenfalls im Anhang zu finden.

Nach (Eisenführ et al. 2010) ist das Potential der *normativ-präskriptiven* Entscheidungstheorie in der Praxis noch längst nicht ausgeschöpft (siehe Kapitel 2.1.1.3). Ziel einer jeden MCDA- Methode ist es, dem ET in solchen komplexen Entscheidungssituationen unter Berücksichtigung aller wichtigen Aspekte Hilfestellungen zu geben, um zu einer für ihn befriedigenden Lösung zu gelangen (Reeg 2009). Unter der Vielzahl an Methoden gibt es generell keine „besseren“ oder „schlechteren“ Ansätze, sondern vielmehr „besser“ oder „schlechter“ geeignete Ansätze für ein bestimmtes Entscheidungsproblem (Polatidis et al. 2006). Nach (Sun et al. 2014) ist die Auswahl einer geeigneten Methode für die Bewertung luftgestützter Plattformen ein eigenes Entscheidungsproblem. Zur Lösung dieses Problems des Methodenpluralismus haben (Sun et al. 2012; Yongchang Li 2007) ein Vorgehen entwickelt, um ausgehend von einfachen, rudimentären Kriterien wie bspw. *Art der Präferenzformulierung*, *gewünschte Konsistenzprüfung* oder *Visualisierung* die geeignetste Methode zu ermitteln. Dabei wird die o.g. Methode *Promethee* leider nicht aufgeführt und berücksichtigt. Den Autoren nach richten sich die nutzbaren Methoden nach den verfügbaren Daten und ebenfalls nach den Präferenzen des ET. Aufgrund dieser Annahme ist es bei undeutlicher und dynamischer Datenlage notwendig, die nutzbaren und weiterführend die geeigneten Methoden zu extrahieren. Für die Bewertung luftgestützter Systeme sollten sich allerdings keine Änderungen der Einsatzbedingungen für die multikriterielle Entscheidungstheorie ergeben. Die Präferenzen des ET sollten nicht in unterschiedlichen Formen vorliegen, so dass sich daraus ggf. Einschränkungen für die MCDA- Methoden ergeben können.

In dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass der ET seine Präferenzen deutlich formulieren kann und eine hierarchische Komplexität vorliegt. Die Festlegung dieser Punkte führt bei der Methodenauswahl nach (Sun et al. 2012; Yongchang Li 2007) bereits zu einer erheblichen Minimierung der auswählbaren Methoden. Passende Methoden generieren eine ganzheitliche Sicht auf das Problem und bilden die Komplexität angemessen ab (Korhonen 2005). Elementare Methoden wie die *Lexikographische Ordnung*, das *Konjunktive* oder *Disjunktive Vorgehen*, die *MaxiMin* oder *MaxiMax* Methode haben sich in der Praxis als ungeeignet erwiesen (Dogson et al. 2001). Aus diesem Grund wurden diese bei der Auflistung in Tabelle 4 nicht weiter berücksichtigt. In den aufgelisteten Arbeiten wurden selten Hinweise zur Intention der Methodennutzung gegeben, so dass keine Eignung objektiv abgeleitet, sondern deren Intention für die Anwendung anderweitig begründet und nicht genau kommuniziert wurde.

Autor	Anwendung	MCDA-Methode
(Curran et al. 2011) (Curran et al. 2010)	Bewertung von Passagierflugzeugen mittlerer Reichweite	AHP
(Dožić und Kalić 2014)	Auswahl von Passagierflugzeugen	AHP
(Gkirgkis et al. 2017)	Vergleich von Airbus A350 und Boeing B787	AHP
(Milan 2010)	Bewertung von Hochgeschwindigkeitstransport-systemen	Topsis
(Čokorilo et al. 2010)	Bewertung von Passagierflugzeugen	Topsis
(Langhans et al. 2010)	Bewertung von Konzepten mit hoher Reichweite	Kostenfunktion
(Milan 1993)	Bewertung von Transportkonzepten	Kostenfunktion
(Weiss et al. 2011)	Bewertung von luftgestützten Transportkonzep-ten	Topsis
(Boccardo et al. 2015) (Boon et al. 2006)	Bewertung von Kartierungsfähigkeiten bei UAVs	Pugh Matrix
(Shilin et al. 2017)	Bewertung von UAVs zur Insektenbekämpfung	Pugh Matrix
(Durst et al. 2014)	Bewertung der missionsspezifischen Leistung von UAVs	Fuzzy AHP
(Li et al. 2005)	Vergleich von Flugzeugkonzepten	Nutzwertanalyse
(Sun 2014)	Bewertungen im Vorentwurf	Topsis
(Sun et al. 2011)	Konzeptauswahl	Topsis, Electre
(Sun und Li 2010)	Bewertung von Steuersystemen bei Luftfahrzeu-gen	Topsis
(Chen et al. 1998)	Bewertung von zivilen Luftfahrzeugen	Nutzwertanalyse
(King und Sivaloganathan 1999)	Konzeptauswahl von Luftfahrzeugen	Vergleichsmatrix
(Rodríguez-Padial et al. 2015)	Auswahl von Wartungskonzepten	AHP
(Kirby und Mavris 1999)	Bewertung im Vorentwurf	Topsis
(Mello et al. 2012)	Bewertung von Luftfahrzeugen	Promethee
(Mattson und Messac 2003)	Auswahl von Flugzeugkonzepten	Pareto
(Rousis 2011)	Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Luftfahrzeugen	Pareto
(Buonanno und Mavris 2005)	Auswahl von Flugzeugkonzepten	Pareto
(Chang und Yeh 2001)	Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit von Flug-gesellschaften	Topsis, SAW
(Wang et al. 2008)	Bewertung der Effektivität von Kampfflugzeugen	Topsis, FAHP
(Wang und Chang 2007)	Bewertung von Trainingsflugzeugen	Topsis
(Sánchez-Lozano et al. 2015)	Bewertung von Trainingsflugzeugen	Fuzzy
(Bruno et al. 2015)	Bewertung von Lfz zur Unterstützung strategi-scher Entscheidungen	FAHP

Tabelle 4: Ausschnitt der *Kompensatorischen* Bewertungsmethoden in der Luftfahrt. *Die Zusammenstellung gibt einen Überblick bzgl. der angewandten Bewertungsmethoden in der Luftfahrt.*

Zwar wurden bei (Sun et al. 2011) drei Methoden hinsichtlich ihres Verhaltens zur Robustheit und Sensitivität überprüft, eine eindeutige Erläuterung der Methodenauswahl bzw. objektive Gegenüberstellung

der Vor- und Nachteile konnte dabei allerdings bei keinem Autor gefunden werden. Daher sind die MCDA- Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für die Anwendung in dem Konzept dieser Arbeit weiter zu untersuchen, was allerdings nicht Teil dieses Kapitels sein soll. Speziell dazu werden in Kapitel 4.3.2.4 spezifische Anforderungen an die entscheidungstheoretischen Methoden – abgeleitet aus den konzeptionellen Anforderungen aus Kapitel 2.3 – formuliert und anschließend die MCDA- Methoden hinsichtlich dieser Anforderungen bewertet.

3.3 Ableitung des Forschungsbedarfs

Der Nachteil dieser gesichteten Bewertungsansätze ist – neben der kaum feststellbaren strukturierten Ableitung des Zielsystems aus der Nutzenabsicht – deren Ausrichtung auf einen speziellen Sachverhalt, bei dem teilweise Kriterien mit aufwändigen Feldversuchen zu ermitteln sind (Durst et al. 2014). Es sind Verfahren wünschenswert, welche nicht auf solche Feldversuche angewiesen sind und verschiedene Luftfahrzeuge auf Basis von strukturierten Vorgehen möglichst objektiv und nachvollziehbar bewerten. Solche systematischen Modellierungen von DSS haben allerdings bisher kaum Beachtung gefunden. Zwar wurde dies von einigen Autoren bereits gefordert und in Ansätzen auch durchgeführt (Durst et al. 2014; Li et al. 2016; Soban 2001), dessen konsequente Umsetzung steht jedoch noch aus. Trotz der Anstrengungen zur Bereitstellung von Vorgehen und Unterstützungssystemen zur Bewertung von Luftfahrzeugen existieren keine ganzheitlichen Ansätze, welche eine missionsorientierte Betrachtung (A1, Kapitel 2.3.2) und eine nachvollziehbare Aufbereitung (A3, Kapitel 2.3.2) des Ergebnisses anstreben und damit ermöglichen.

Auswahlentscheidungen in der Luftfahrt sind geprägt durch eine wachsende Komplexität sowie eine häufig schlechte Strukturierung des Entscheidungsproblems (welches sich nur schwer in Bewertungsverfahren formalisieren lässt) und kompensatorische bzw. konfligierende Korrelationen zwischen den Bewertungskriterien. Die gängige Bewertungspraxis besteht aus einem Methodenmix, wobei eindimensionale, komplex quantitative und verbalargumentative Bewertungsverfahren kombiniert werden (Harth 2006). Die aufgezeigten Ansätze sind für die in dieser Arbeit angestrebte Zielsetzung nicht geeignet, da sie sich zum einen jeweils auf spezifische Gesichtspunkte und Anwendungsbereiche konzentrieren wie bspw. bestimmte, teilweise auch kombinierte Aspekte (Bewertung der Autonomie unbemannter fliegender Plattformen), spezielle Eigenschaften (monetär/ nicht monetär, formalisiert/ nicht formalisiert) oder auf eine spezifische Problemstellung (Bewertung von Transportflugzeugen). Relativierend muss natürlich deren Einsatzbereich und Intention betrachtet werden. Zum Zweiten stellen sie dem ET kein strukturiertes, implementiertes Vorgehen zur Verfügung, welches die Komplexität der Bewertungsaufgabe beherrschbar macht und die Entscheidungsfindung transparent (A2, Kapitel 2.3.2) und nachvollziehbar unterstützt. Die grundsätzliche Bedeutung einer methodischen Unterstützung wurde bereits in Kapitel 2.2.1 unterstrichen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass trotz der gemachten Anstrengungen zur Bereitstellung von Vorgehen und Unterstützungssystemen zur Bewertung von Luftfahrzeugen keine Ansätze existieren, welche eine missionsorientierte Betrachtung und eine nachvollziehbare Aufbereitung des Ergebnisses anstreben.

Die Autoren der gesichteten Ansätze betrachten den weitestgehend erforschten Bereich der MCDA- Methodik[50], vernachlässigen allerdings die strukturierte Ableitung und Aufbereitung der Datenbasis (A2.1, Kapitel 2.3.2) in der Entscheidungsvorbereitung sowie die nachvollziehbare Aufbereitung und Analyse des Bewertungsergebnisses (A4.1, Kapitel 2.3.2). Dadurch scheint es angezeigt, eine Methodik für ein DSS zur Unterstützung von Auswahlentscheidungen für Luftfahrzeuge zu entwickeln, welche sich dieser Problemstellung annimmt.

[50] Wie in vielen bisherigen Arbeiten betont, kommt der Nutzung einer geeigneten MCDA- Methode eine ebenso wichtige Bedeutung zu, wodurch eine tiefgreifende Recherche der bestehenden Methoden notwendig und in Kapitel 4.3 durchgeführt wird.

4. Konzept und Methodenfindung

Um dem in Kapitel 3.3 dargestellten Forschungsbedarf gerecht zu werden, wird in Kapitel 4.1 ein Ansatz für ein DSS vorgeschlagen. Dieser besteht aus einem *Makro-Konzept* und einem darin integrierten *Mikro-Konzept*. Der Beschreibung des generischen Rahmens (*Makro-Konzept*) in Kapitel 4.1 folgen methodische Überlegungen zur Ableitung der entscheidungsrelevanten Parameter (Gewichtungen, Wertfunktionen) in der zugrundeliegenden Datenbasis im *Mikro-Konzept* (Kapitel 4.2). Anschließend wird eine geeignete Methode zur Strukturierung ausgewählt und durch Modifikationen hinsichtlich der konzeptionellen Anforderungen angepasst. Weiterhin erfolgt eine Sichtung geeigneter Ansätze der Mehrfachzielentscheidung zur Anwendung innerhalb des *Makro-Konzeptes* und deren Auswahl in Kapitel 4.3.

4.1 Generischer Rahmen: *Makro-Konzept*

Das Prozessmodell des *Makro-Konzeptes* ist in Abbildung 13 dargestellt und besteht aus mehreren Teilprozessen, um einen ganzheitlichen Ansatz zur Systemanalyse und -bewertung zu realisieren. Der erste Teilprozess (*Stakeholder Expectations Process*, SEP) befasst sich mit der Bestimmung der Nutzenabsicht (berücksichtigte Mission(en)), Alternativen und genutzten Ressourcen (bspw. externe Fachleute). Die Spezialisierung auf den Anwendungsbereich der Bewertung luftgestützter Systeme erfolgt durch die zugrundeliegende Datenbasis, welche in dem *Mikro-Konzept* methodisch abgeleitet wird. Dieser zweite Teilprozess (*Metric Derivation Process*, MDP) leitet eine Struktur aus gewichteten und ggf. voneinander abhängigen Kriterien in Bezug zu der definierten Nutzenabsicht (Mission) ab. Weiterhin werden die Ausprägungen der Kriterien mit objektiven Berechnungsmodellen bestimmt. Dieser Prozess dient zur Ermittlung einer domänenabhängigen Datenbasis für den Bewertungsprozess. Dabei greift der SEP direkt auf die Daten des *Mikro-Konzeptes* (Missionen, Datensätze der Alternativen) zu und verwaltet diese, so dass der SEP selbst keine anwendungsbezogenen Daten enthält. Vielmehr wird dem SEP eine Struktur von Missionen sowie die zur Verfügung stehenden Alternativen aus dem MDP beigestellt. Die beteiligten Fachleute (*Subject Matter Experts*, SME) werden

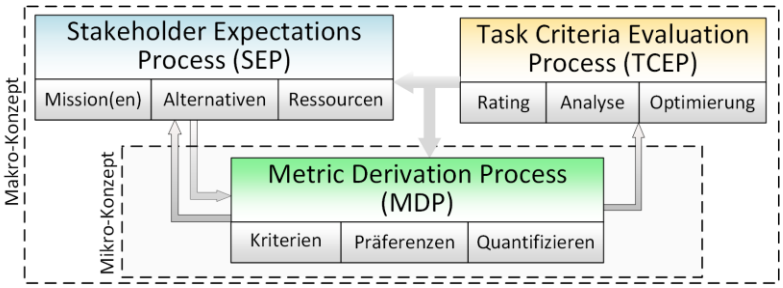


Abbildung 13: Prozessmodell des *Makro-Konzeptes*. *Das Makro-Konzept besteht aus drei Teilprozessen. Dabei stellt das Mikro-Konzept den zentralen Prozess dar, welcher die Daten sowohl für den SEP als auch den TCEP bereitstellt. Das Mikro-Konzept ist dabei in dem Makro-Konzept integriert und sorgt für die spezifische Anwendung des Verfahrens.*

auf Basis ihrer Expertise hinzugezogen, um den Aufbau der Datenbasis innerhalb des *Mikro-Konzeptes* in Form von A-Priori Wissen zu unterstützen. Damit wird dem ET das entsprechende fachspezifische Wissen auf Basis der betrachteten Nutzenabsicht im *Mikro-Konzept* bereitgestellt. Der SEP dient damit zur Spezifizierung der Bewertungsaufgabe, indem er auf die A-Priori Datengrundlage des MDP zugreift und die Auswahl des ET bzgl. der zu betrachtenden Missionen und der zu bewertenden Luftfahrzeuge (Alternativen) wieder an diesen übergibt.

Nach (Marsh et al. 2016) kann die Qualität[51] des Entscheidungsprozesses durch die Nutzung eines strukturierten Ansatzes in Verbindung mit Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie erheblich verbessert werden. *„By doing so, they can help increase the consistency, transparency, and legitimacy of decisions"* (Marsh et al. 2016). Der dritte Teilprozess (*Task Criteria Evaluation Process*, TCEP) nutzt daher Methoden der Mehrfachzielentscheidung, um das Potential einer Alternative zur Erfüllung der Nutzenabsicht zu bestimmen und weitere Analysen des Ergebnisses durchzuführen. Weiterführend können in diesem Prozess Optimierungen durchgeführt werden, um bspw. dominante Ausprägungen spezieller Kriterien abzuleiten und damit das *Requirements Engineering* zu unterstützen.

Die Spezialisierung auf den Anwendungsbereich entsteht erst durch das *Mikro-Konzept*, welches die Datenbasis beinhaltet und diese dem SEP in Form einer Datenbank zugänglich macht sowie für den TCEP aufbereitet und strukturiert. Damit ist der Rahmen des DSS (*Makro-Konzept*) eher allgemeiner Natur und geht über den hier betrachteten domänenspezifischen Bereich der Bewertung luftgestützter Systeme hinaus.

In den folgenden Kapiteln werden die Module MDP (*Mikro-Konzept*, Kapitel 4.2) und TCEP (Kapitel 4.3) näher erläutert. Dabei adressieren diese Module jeweils mindestens eine Anforderung aus Kapitel 2.3.2. Der Bezug zwischen diesen Anforderungen und den Modulen des DSS ist in Abbildung 14 dargestellt. Darin sind die Module des DSS in der Mitte, die Anforderungen links und rechts gelistet. Die Zugehörigkeit der Module zu den beiden Prozessen (MDP und TCEP) ist entsprechend farblich hinterlegt. Die Linien verdeutlichen, welche Anforderung in den jeweiligen Modulen und folgenden Kapiteln zugrunde gelegt werden. Die Berechnungsmodule und die automatisierte Erstellung eines Reports sind dabei nicht Teil des theoretischen Konzeptes. Erstere werden gesondert bei der Implementierung der Methodik in Kapitel 5.3 adressiert.

4.2 Metric Derivation Process: *Mikro-Konzept*

Innerhalb des *Mikro-Konzeptes* wird die Datenbasis anhand der ausgewählten Missionen (aus SEP) instanziiert, welche die Kriterienstruktur und weitere entscheidungsrelevante Parameter enthält. Die Datenbasis besteht dabei aus:

[51] Mehr zur Qualität von Entscheidungen bei (Schopphoven 1996)

- Einer deskriptiven (missionsbezogene) Struktur aus Fähigkeiten und Kriterien,
- den Wertvorstellungen der Stakeholder (Gewichtung, Zielfunktionen und Präferenzen) als relevante Entscheidungsparameter,
- den *Wechselwirkungen* und *Abhängigkeiten* innerhalb der Fähigkeiten und Kriterien.

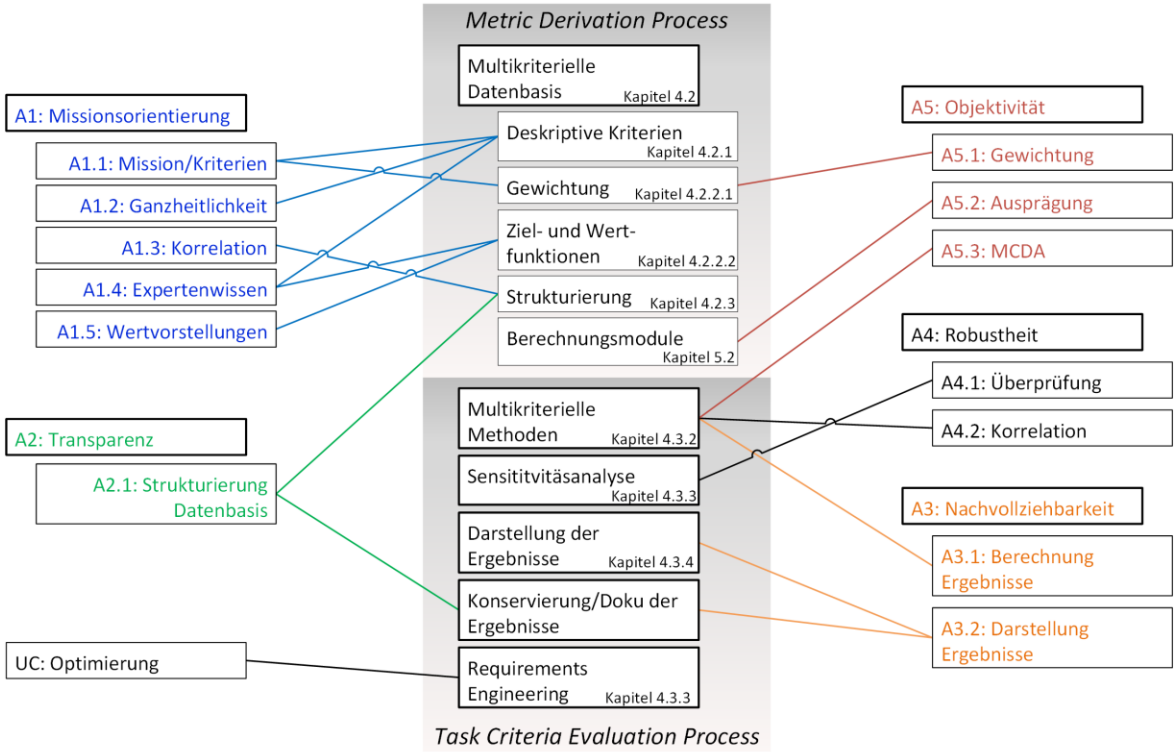


Abbildung 14: Abdeckung der Anforderungen und der Konzeptmodule des DSS. *Die folgenden Kapitel sind als entsprechende Module des DSS in der Mitte dargestellt. Links und rechts sind die einzelnen konzeptionellen Anforderungen aus Kapitel 2.3.2 aufgeführt. Die Linien verdeutlichen die Adressierung der Anforderungen durch die einzelnen Module.*

Damit befasst sich der MDP im Wesentlichen mit der domänenspezifischen Strukturierung und Befüllung der Datenbasis und verwaltet diese (Datenbank), welche sowohl als Eingangsdaten für den TCEP als auch als Datengrundlage für den SEP dient. Nachfolgend werden die einzelnen Module aus Abbildung 14 zur Ableitung und Strukturierung einer multikriteriellen Datenbasis in gelisteter Reihenfolge betrachtet.

4.2.1 Bestimmung deskriptiver Kriterien

Eine Ursache für fehlerhafte Entscheidungen ist die Berücksichtigung nicht repräsentativer Kriterien (Breiing und Knosala 1997). Allgemein bilden Kriterien die Basis für das Entscheidungsmodell und werden ausgehend von den Zielen des ET festgelegt, welche wiederum von den betrachteten Missionen abhängig sind.

Für die folgenden Ausführungen sollen einige Begriffe aus der Graphentheorie eingeführt werden, welche für das Verständnis notwendig sind:

Kriterienbaum Kriterienhierarchie	Zur übersichtlicheren Darstellung der Kriterien können diese in eine entsprechende hierarchische Struktur überführt werden (siehe Abbildung 15). Diese Struktur besteht aus einzelnen Knotenpunkten, die wie ein Baum aufgebaut sind.
Eltern/Kind Kriterien	Ein übergeordnetes Kriterium wird als Eltern-Kriterium, ein untergeordnetes Kriterium als Kind-Kriterium bezeichnet.
Ast	Die Verbindung zwischen Eltern-Kindern ist ein Ast des Baumes.
Knoten(punkt)	Ein Knoten ist dabei ein Punkt, an dem sich ein Kriterium spaltet. Dabei werden alle Kinder betrachtet, so dass ausgehend von dem definierten Kriterium alle Kinder berücksichtigt werden.
Blätter	Ein Blatt des Baumes ist wie ein Knoten, jedoch verzweigen sich von diesem Knoten keine weiteren Äste. Ein Kriterium an dieser Position wird als *Elementares Kriterium* verstanden.
Einträge	Die Kriterien in einem Baum werden generisch *Einträge* genannt, da diese Bäume auch für Missionen oder Fähigkeiten aufgebaut werden.
Ebene	Mit jeder weiteren Verzweigung eines Eintrages entsteht eine neue Ebene. Die Ebenen beschreiben die Tiefe der betrachteten Struktur.

In der Graphentheorie wird zur Strukturierung der Kriterien eine Hierarchie bzw. eine Baumstruktur (Teschl 2007) genutzt, so auch in dieser Arbeit. Im Folgenden soll die Ableitung einer solchen Hierarchie sowie die Aufstellung der Fähigkeiten bzw. Kriterien genauer behandelt werden. Dabei wird sich – wie bereits beschrieben – auf die Domäne der militärischen Luftfahrzeuge beschränkt.

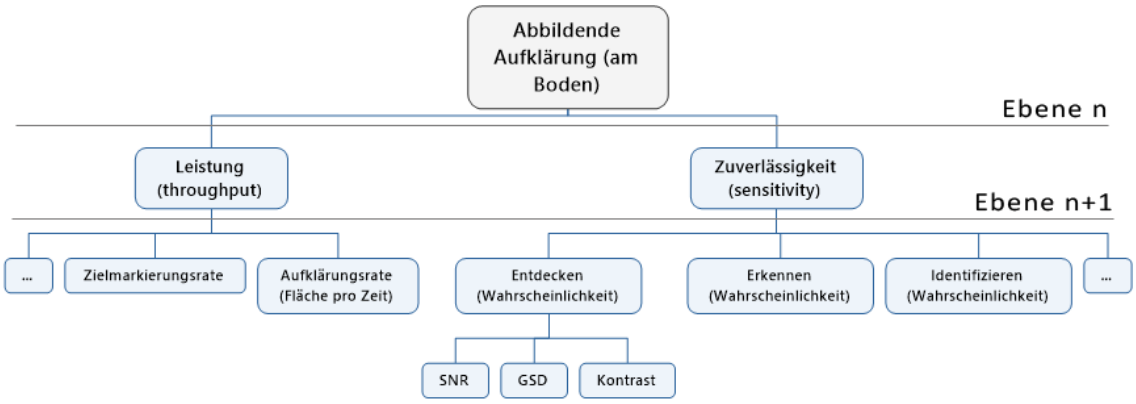


Abbildung 15: Qualitatives Beispiel für einen Kriterienbaum. *Qualitativ dargestellt ist das Eltern-Kriterium „Abbildende Aufklärung" mit den Kind-Kriterien „Leistung" und „Zuverlässigkeit". Diese fungieren ebenfalls als Eltern-Kriterien für die untergeordnete Ebene. (SNR: Signal to Noise Ratio, GSD: Ground Sample Distance)*

4.2.1.1 Blockstruktur

Das Vorgehensmodell zur Ableitung der Hierarchie ist in Abbildung 16 dargestellt und beginnt mit der Definition der Nutzenabsicht, hinsichtlich deren Erfüllung die betrachteten Alternativen bewertet und verglichen werden sollen. Eine umfassende Komposition unterschiedlicher Missionen ist im *Missionen Block* definiert und kann durch den ET ausgewählt werden. Ebenfalls auf der Ebene des *Missionen Blocks* wird im induktiven Teil abschließend das SPP zur Erfüllung ebendieser gesetzten Missionen jeder Alternative ermittelt. Dieses SPP beinhaltet die *System Effectiveness* (Nutzen) und die *System Efficiency* (Nutzen/Kosten), welche sich aus dem *Operations Research*[52] als Funktion unterschiedlicher Fähigkeiten (*engl. „-ilities"*) ableitet (Tillman et al. 1980). Folglich wird der *Missionen Block* im deduktiven Teil mit einem *Fähigkeiten Block* verknüpft, welcher sogenannte *Fähigkeitsbausteine* enthält, die zur Erfüllung der entsprechenden Missionen notwendig sind. Die Fähigkeiten wurden dabei vom Planungsamt der Bundeswehr[53] bezogen und für den Anwendungsfall luftgestützter Systeme adaptiert. Dabei entsteht innerhalb des *Fähigkeiten Blocks* bereits eine Hierarchie an *Fähigkeitsdomänen* und dekomponierten *Fähigkeitsbausteinen* über mehrere Ebenen. Beispielsweise zerfällt die Fähigkeitsdomäne *Aufklärung* in entsprechende Fähigkeitsbausteine wie *Abbildende Aufklärung*, *Gemeinsame sensorübergreifende Aufklärung*, *Signalerfassende Aufklärung* etc. (siehe Abbildung 10, Kapitel 2.1.2.3.2). Der Baustein *Abbildende Aufklärung* zerfällt dabei weiter in Sub-Bausteine wie bspw. *Abbildende Aufklärung am Boden*.

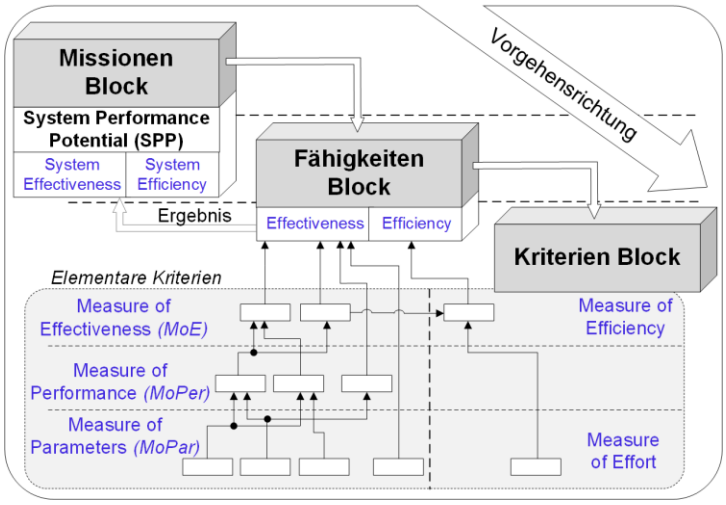


Abbildung 16: Block Struktur zur Ableitung der deskriptiven Kriterienstruktur. *Ausgehend von der Nutzenabsicht werden relevante Fähigkeitsblöcke definiert und diese werden wiederum mit einer entsprechenden Kriterienstruktur hinterlegt. Die Elementaren Kriterien sind diejenigen Kriterien, welche erstmal quantifiziert werden können und damit nicht weiter dekomponiert werden.*

Zur Ableitung einer geeigneten Struktur ist eine hierarchische Vorgehensweise erforderlich, bei der umfassende *Fähigkeitsdomänen* in *Fähigkeitsbausteine* und weiter in Sub-Bausteine zerlegt werden[54]. Ausgangspunkt der Zerlegung ist der oberste Eintrag (*Top-Down* Ansatz); er wird in mehrere,

[52] Die Einordnung der betrachteten Problemstellung dieser Arbeit in das *Operations Research* ist bereits in Kapitel 2.1.1.2 behandelt worden.

[53] Die Fähigkeitsbausteine der Bundeswehr umfassen 300 Fähigkeiten, welche nach den Fähigkeitsdomänen *Aufklärung*, *Wirkung*, *Unterstützung* und *Führung* gegliedert sind. Diese Bausteine beziehen sich auf das gesamte Einsatzspektrum der Bundeswehr.

[54] Eine Reihe von Studien hat die Wirksamkeit der Dekomposition bei komplexen Problemen untersucht (Armstrong et al. 1975; MacGregor et al. 1988). Darin konnte gezeigt werden, dass das Urteilsvermögen verbessert wird, wenn ein Problem in eine Reihe von Teilproblemen aufgeteilt wird.

möglichst überschneidungsfreie Subeinträge bzw. -knoten zerlegt. Die so in der zweiten Hierarchiestufe der Struktur entstehenden Knoten werden wiederum in überschneidungsfreie Teilmengen gegliedert usw. Daraus ist ersichtlich, dass jede Struktur beliebig tief gegliedert werden kann. Allerdings steigt mit jeder Dekomposition der mögliche Informationsverlust an. Der Zerlegungsprozess sollte daher abgebrochen werden, wenn die Teilziele eine Operationalität erreicht haben, die sie als Zielkriterien geeignet erscheinen lassen (Breiing und Knosala 1997). Als Zielkriterien geeignet sind Teilziele dann, wenn allen Luftfahrzeugen eine messbare Ausprägung bezüglich des betrachteten Zielkriteriums eindeutig zugeordnet werden kann (Quantifizierung). Die Fähigkeitsbausteine sind sehr abstrakt formuliert, so dass eine Quantifizierung auf dieser Ebene nicht möglich ist. Beispielsweise lässt sich die zugehörige Ausprägung zu dem Fähigkeitsbaustein *Abbildenden Aufklärung am Boden* (siehe Abbildung 15) nicht quantifizieren.

Aus diesem Grund ist eine weitere Dekomposition notwendig, welche im anschließenden *Kriterien Block* stattfindet. Innerhalb dieses Blocks sind ebenfalls mehrere Ebenen zu finden, welche sich nach den verfügbaren Berechnungsmodulen (BM) richten. Die oberste Ebene ist – in Anlehnung an die Nomenklatur des OR – die *Measure of Effectiveness* Ebene (MoE), welche ebenfalls abstrakt formulierte, allerdings bereits quantifizierbare Kriterien enthält bzw. enthalten kann. Kriterien auf dieser Ebene sind bspw. die *Leistung* oder die *Zuverlässigkeit* (siehe Abbildung 15). Können die Ausprägungen dieser Kriterien mit hochentwickelten Berechnungsmodulen (BM) ermittelt werden, so werden diese Kriterien auf der MoE-Ebene zu messbaren *Elementaren Kriterien* (vgl. Zielkriterien). Diese bilden die Blätter des Baumes und sind direkt abhängig von den verfügbaren BM. Sind keine entsprechenden BM auf dieser Ebene vorhanden, ist der Zerlegungsprozess fortzusetzen. Dies geschieht auf der *Measure of Performance* Ebene (MoPer), wobei die Kriterien weiter dekomponiert werden. Die *Leistung* zerfällt bspw. in die *Zielmarkierungsrate*, die *Aufklärungsrate*, etc. Auf dieser Ebene können spezialisierte BM genutzt werden, um die Ausprägungen zu ermitteln. Sind diese ebenfalls nicht vorhanden, ist soweit zu dekomponieren, bis ein probates BM verfügbar oder die *Measure of Parameters* Ebene (MoPar) erreicht ist. Auf dieser Ebene werden nur Systemparameter als *Elementare Kriterien* betrachtet, welche in jedem Fall quantifizierbar sein sollten. Mögliche Parameter für die *Entdeckungswahrscheinlichkeit* ist der *Signal zu Rauschabstand* (SNR), die *Ground Sample Distance* (GSD) oder der *Kontrast* (siehe Abbildung 15). Deutlich hervorzuheben ist, dass mit jeder Dekomposition ein Verlust an Informationen einhergeht, wodurch die *Elementaren Kriterien* auf der höchst möglichen Ebene innerhalb des *Kriterien Blocks* definiert werden sollten.

Kriterien und Fähigkeiten unterscheiden sich im Folgenden dadurch, dass Kriterien im Vergleich zu Fähigkeiten quantifizierbar und messbar sind (sein müssen). Fähigkeiten sind daher als Verknüpfung zwischen den Missionen und den deskriptiven Kriterien zu verstehen. Das Konzept sieht vor, diese Struktur aus Fähigkeiten und Kriterien in einem – mit Experten entwickelten – strukturierten und formalisierten A-Priori Wissen dem Bewertungsprozess beizustellen, so dass der ET seine Nutzenabsicht auswählt und darauf aufbauend die deskriptiven Kriterien in Kombination mit deren Fähigkeiten anhand der Wissensbasis gesetzt werden. Die Anforderungen an die *Elementaren Kriterien* können aus den konzeptionellen Anforderungen (Kapitel 2.3.2) abgeleitet werden und sind nach (Bartusseck 2008):

A5.2 Objektive Ermittlung der Kriterienausprägung

1. *Messbarkeit*: Die Erreichung der Ziele sollte *möglichst treffend* und *eindeutig* messbar sein. *Möglichst treffend* bedeutet: Es dürfen nur Eigenschaften der Luftfahrzeuge betrachtet werden, welche eine gewisse Wichtigkeit für die Erfüllung der Nutzenabsicht besitzen. Werden nicht relevante Fähigkeiten/Kriterien berücksichtigt (bspw. *Manövrierbarkeit* bei einer *Transportmission*) oder relevante Fähigkeiten/Kriterien nicht berücksichtigt (bspw. *Transportleistung*), wird das Zielsystem verfälscht. Die *Eindeutigkeit* beschreibt die präzise Ermittlung der Ausprägung der beschreibenden Kriterien mit einem möglichst objektiven Vorgehen.

A1.2: Holistische Betrachtung der Systemfähigkeiten

2. *Vollständigkeit*: Eine Vollständigkeit der Bewertung im Sinne einer Erfassung aller Wirkungen ist unrealistisch und entspräche dem Zustand der vollkommenen Information, welcher bei der Bewertung allgemein und speziell im Entwurfsprozess einen theoretischen Grenzfall darstellt (Koch 1996). Bei der Bewertung komplexer Systeme ist davon auszugehen, dass grundsätzlich unvollständiges Wissen über Wirkungen und Kosten vorliegt, was eine Robustheitsbetrachtung des Bewertungsergebnisses im Nachhinein erfordert. Dazu stellt die entwickelte Methodik ebenfalls ein methodisches sowie implementiertes Vorgehen bereit (siehe Kapitel 4.3.3).
3. *Redundanzfreiheit*: Es sollte nicht mehrere Fähigkeitsbausteine oder Kriterien geben, welche sich in einer Ebene in ihrer Bedeutung überschneiden (*Orthogonalität*[55]). Damit würde die entsprechende Eltern-Fähigkeit bzw. das Eltern-Kriterium unbewusst eine größere Gewichtung für die Erfüllung der Nutzenabsicht erhalten und weiterführend ggf. das Gesamtergebnis verfälschen. Zum Beispiel würden sich die Kriterien *Komfort*, *Lautstärke* und *Vibration* als Geschwister teilweise überschneiden und kein probates Zielsystem darstellen[56].

4.2.1.2 Generierung: Wissensakquisition

Zu den relevanten Bewertungskriterien gehören alle Kriterien, welche nicht nur eine quantitative Unterscheidung der betrachteten Luftfahrzeuge ermöglichen, sondern auch einen Bezug zur Erfüllung der definierten Nutzenabsicht aufweisen. Dabei gibt es nach (Harth 2006; Backhaus 2010; Melles 2001) unterschiedliche Arten von Bewertungskriterien mit entsprechenden Anforderungen:

Kriterien	Definition
saliente	Diese Kriterien sind offensichtliche, naheliegende, triviale Merkmale, welche für eine Bewertung intuitiv sofort zu betrachten sind.
maßgeblich	Die Kriterien haben eine direkte Relevanz für die Betrachtung der Nutzenabsicht.

[55] *Orthogonalität* beschreibt in der Mathematik, wenn der Winkel zwischen zwei Vektoren senkrecht ist (Skalarprodukt = 0). Die *n* Kriterien spannen einen *n*-dimensionalen Raum auf. Wird dieser Raum auf zwei Dimensionen reduziert, sollten alle Kriterien in der Theorie orthogonal sein, was nicht möglich ist. Daher berücksichtigt die *Orthogonalität*, dass alle Kriterien unterschiedliche Eigenschaften der Alternativen adressieren und sich diese nicht überschneiden.

[56] Der *Komfort* steht in der Taxonomie über der *Vibration* und der *Lautstärke* und schließt diese ein.

determinante	Diese Kriterien stehen in enger Beziehung zu den Präferenzen des ET. Ein Unterschied in diesen Kriterien determiniert direkt eine Präferenzveränderung.
wichtige	Ist eine Teilmenge der *determinanten* Kriterien (siehe obiger Begriff), welche für sich allein als bedeutungsvoll eingestuft, allerdings ggf. nicht entscheidungsrelevant sein kann (bspw. identische Ausprägungen aller Alternativen, wodurch das Kriterium eliminiert wird).
empirisch abhängige	Diese Kriterien sagen den Trend der Ausprägungen anderer Kriterien voraus, bspw. *Stationäre* und *Instationäre Wenderate*. Diese (Un)Abhängigkeit zwischen den Kriterien kann zu einer Veränderung der Bewertungsstrategie des ET führen (Melles 2001), was in dieser Arbeit durch die *Wechselwirkungen* (siehe Kapitel 4.2.3.7.2) berücksichtigt wird.
präferenzunabhängige	Die Präferenz eines Experten bzw. ET bzgl. der Ausprägung eines Kriteriums sollte unabhängig von den übrigen Ausprägungen der Kriterien sein. Diese Präferenzunabhängigkeit kann bspw. mit einer Faktorenanalyse überprüft werden.

Für diese Arbeit sind all diese Kriterien relevante Bewertungskriterien (Harth 2006), welche in Prozessen der Kriteriengewinnung aufzustellen sind (Schweikl 1985). Nach (Melles 2001) wird der Ableitung dieser Kriterien oft wenig Beachtung geschenkt, diese teilweise gar nicht erläutert[57] oder nicht transparent dargestellt, was aufgrund der Relevanz der Kriterien für den Ausgang des Bewertungsprozesses problematisch ist (Harth 2006).

Wie in Kapitel 2.1.1.3 beschrieben, kommen für die Bewertung von luftgestützten Systemen *Kompensatorische Methoden* zum Einsatz, welche in Abbildung 17 unter die Kategorie *„Methoden zur Beurteilung und Auswahl von Alternativen“* fallen. Bei den *„Methoden zur Darstellung und Beschreibung von Varianten“* sind Ansätze enthalten, *„welche der umfassenden und systematischen Aufbereitung der Daten und Informationen für die Entscheidung (z.B. Kriterien)“* (Müller-Herbers 2007) und zur Kriteriengewinnung dienen. Für diese Kriteriengewinnung bieten sich unterschiedliche Varianten an, wie bspw. *Brainstorming*, *Expertenbefragungen* oder Verfahren wie die *Wertbaumanalyse* (Müller-Herbers 2007). Durch Beratungen, Diskussionen, Interviews und Workshops kann Wissen in Zusammenarbeit mit Experten erarbeitet werden. Diese Methoden erzeugen eine entsprechende Breite bzw. Abdeckung, was bei dem Aufbau eines Zielsystems erwünscht ist.

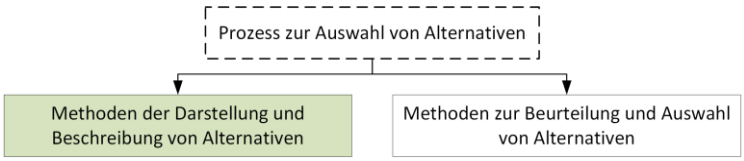


Abbildung 17: Auswahl der Methoden zur Erzeugung von Komplexität. *Zur Erzeugung von Komplexität werden Methoden wie Brainstorming oder Expertenbefragungen eingesetzt.*

[57] (Harth 2006) vermutet, dass die Kriterien oft im *„Elfenbeinturm des Wissenschaftlers“* entstehen.

Während das *Brainstorming* im Rahmen des Entwurfsprozesses von Luftfahrzeugen nur in der Konzeptfindung (*Conceptual Design*) zum Einsatz kommt (Sadraey 2013), nutzen (Bonnefoy et al. 2010) *Brainstorming* mit Expertenbeteiligung für die Ableitung von Bewertungskriterien. (English und Kernan 1976) wenden einen der *Delphi-Methode* (Häder und Häder 2000) ähnlichen Ansatz an, um eine Kriterienliste für die Abschätzung von Zukunftstechnologien in der Luftfahrt zu erstellen. Ein *Delphi*-Ansatz ist auch Bestandteil bei (Gan et al. 2015) zur Vorhersage von unsicheren Ereignissen bei der Flugverkehrskontrolle. Weitere Ansätze zur Auswahl von Kriterien stützen sich bspw. auf die Identifikation kritischer Parameter bzw. Beschränkungen (Koornneef et al. 2017; Mavris und DeLaurentis 2000), auf die Festlegung von Kostenparameter (Scholz 1998; Milan 1993) oder auf die Vor- und Nachteile der betrachteten Alternativen (de Almeida et al. 2005). In einigen Fällen ist die Auswahl der Kriterien durch die (Nicht-) Verfügbarkeit von quantitativen und/oder qualitativen Daten eingeschränkt (Gkirgkis et al. 2017). Teilweise wird der Umfang der berücksichtigten Kriterien an der verfügbaren Zeit für die Ableitung des Bewertungsergebnisses ausgerichtet (Gkirgkis et al. 2017). (Weiss et al. 2011) richtet seine Kriterien auf die späteren Stakeholder aus, wobei nicht beschrieben wird, wie sich die Kriterien ableiten oder wie diese identifiziert wurden.

Besonders bei der Bewertung luftgestützter Systeme scheint es angezeigt, bereits bei der Auswahl der Kriterien entsprechende Fachleute zu involvieren. Einige der bestehenden Verfahren eignen sich, diese essentielle Partizipation aufzugreifen. Dazu gehören *Gruppendiskussionen*, *Gruppeninterviews* oder Kreativitätstechniken wie *Brainstorming*, *Brainwriting* oder *Meta-Plan*-Techniken. Andere Verfahren wie *Elicitationstechniken* oder *Projektive Verfahren* nutzen spezielle Interviewtechniken, damit die Befragten selbstständig *wichtige* und *saliente* Kriterien artikulieren. Eine gleichzeitige Selektion der aufgestellten Kriterien im Hinblick auf die Maßgeblichkeit wird von der *Multidimensionalen Skalierung* oder der *Repertory-Grid-Methode* (Tan und Hunter 2002) verfolgt. Letztere nutzt sogenannte Elemente (Alternativen), welche den Experten vorgelegt werden. Diese haben anschließend die Aufgabe, unterscheidende Merkmale (Konstrukte) zu identifizieren und diese in einer Matrix (*Grid*) mit entsprechenden Erfüllungsgraden der Alternativen zu hinterlegen. Die Komplexität luftgestützter Systeme erfordert allerdings hohe kognitive Anforderungen sowohl an die Befragungsperson als auch an den Anwender. Weiterhin darf die Fragestellung weder zu eng noch zu weit gefasst sein. Eine große Stärke dieser Methode ist die gleichzeitige Ermittlung von Ausprägungen für die Alternativen, wodurch eine Zielertragsmatrix entsteht und diese Methode eher bei der Entscheidungsfindung im nächsten Kapitel zu nennen ist. In dieser Arbeit ist eine subjektive Ausprägungsermittlung allerdings nur für den Fall zu betrachten, dass die Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* nicht objektiv ermittelt werden können. Damit dient diese Methode vorwiegend zur Ermittlung subjektiver Assoziationen, ist allerdings für die Ableitung von Kriterien nicht geeignet.

Verfahren	***Anwendung***
Einzelinterview	88
Zielgruppenbefragung	84
Expertenbefragung	56
Gruppendiskussion	41
Repertory Grid	9
andere	16

Tabelle 5: Angewandte Verfahren nach (Melles 2001). *Ergebnis einer Befragung von Firmen und Hochschulen für den Zeitraum 1993-1998.*

In Tabelle 5 ist eine quantitative Aufstellung der angewandten Verfahren zur Gewinnung und Generierung von Bewertungskriterien aufgeführt. Es zeigt sich, dass die *Repertory-Grid* Methode allgemein eine

geringe Anwendung erfährt, da bei dieser Methode ein systematischer Vergleich und damit bereits eine Bewertung stattfinden (Rosenberger und Freitag 2009). Der ET soll allerdings in ebendieser Bewertung unterstützt werden, d.h. wie in Kapitel 2.2 beschrieben ist dieser systematische Vergleich bei mehreren Eigenschaften nicht hinreichend genau durchführbar und damit wenig erfolgsversprechend.

Für die Ermittlung der Kriterien in dieser Arbeit kommen daher die Methoden der *Experten- und Zielgruppenbefragung*, der *Einzelinterviews* und der *Gruppendiskussionen* in Betracht. Dabei kommt eine Zielgruppenbefragung bspw. für die Ermittlung der Kundenwünsche im Entwurfsprozess zur Anwendung, was in dieser Arbeit allerdings keine Beachtung finden soll. Daher kann diese Methode ebenfalls vernachlässigt werden. Als Prozess zur kontrollierten Meinungsbildung ist die *Delphi-Methode* bekannt, welche aus einer anonymen Einzeleinschätzung und einer anschließenden iterativen Gruppeneinschätzung besteht. Die Anonymisierung erfolgt durch eine schriftliche Bearbeitung, welche allerdings einen aktiven, direkten Austausch unter den Beteiligten verhindert[58]. Ziel der *Delphi*-Befragung ist es, eine stabile Gruppenmeinung zu erhalten[59]. Diese Methode scheint für die Anwendung in dieser Arbeit vielversprechend, da sie die gängigen verbalen Methoden zur Kriteriengewinnung (*Expertenbefragung*, *Einzelinterviews* und *Gruppendiskussionen*) kombiniert (Häder und Häder 2000). Für den Einsatz in dieser Arbeit soll allerdings aufgrund der schwierigen Umsetzung auf die Anonymität – welche von der ursprünglichen Methode gefordert wird – verzichtet werden. Weiterhin soll ebenfalls eine bereits existierende Datengrundlage von aufgestellten Fähigkeiten oder Kriterien genutzt und innerhalb des abgewandelten *Delphi*-Prozesses diskutiert werden. Ebenfalls erfolgt eine Anpassung des Ablaufes, so dass neben den schriftlichen Inhalten ebenfalls verbale Prozesse (Diskussion) integriert werden (Schneider 1994). Der schematische Ablauf der Wissensakquisition[60] ist in Abbildung 18 dargestellt. Dabei wird ein iteratives Vorgehen zwischen *Brainstorming*, *Brainwriting* und *Gruppendiskussion* angewandt, bis es schlussendlich zu einer Konsensbildung zwischen den Experten unter Einbezug bestehender Literatur[61] kommt. Die Leitung des Prozesses übernimmt ein „*Knowledge Engineer*“ [62], um das Wissen der Experten zu

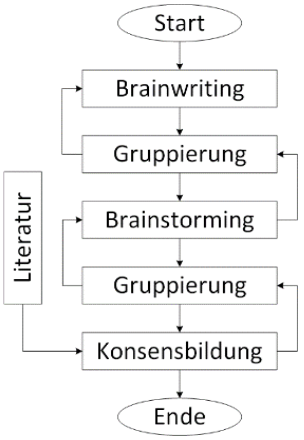


Abbildung 18: Ablauf der Wissensakquisition. *Der Prozess besteht aus einem iterativen Brainstorming und Brainwriting und einer Konsensbildung unter Berücksichtigung bestehender Kriterien.*

[58] Ursprünglich zur Entgegenwirkung der üblichen Gruppendynamik von sehr dominanten Personen.

[59] https://www.bipar.de/delphi-befragung/, zuletzt besucht am 12.06.2018

[60] Grundmodelle der Wissensakquisition können bei (Kurbel 1989) nachgelesen werden

[61] Oft sind die Kriterien bei der Bewertung luftgestützter Systeme bereits durch Entwurfs- oder Beschaffungsanforderungen vorgegeben. So bezieht sich bspw. (Curran et al. 2011; Gollnick et al. 2011; Sun 2014) bei der Bewertung von Transportflugzeugen auf Anforderungsbeschreibungen, wobei diese nicht in Gänze abgebildet und berücksichtigt werden. (Stumpf et al. 2011) stützen sich unter anderem auf Daten der EUROCONTROL, bereitgestellt durch (Fullalove 2017) und auf die VDI-Richtlinie 3780 (Zweck 2013). (Durst et al. 2014) nutzen die STANAG 4586 (Marques 2012) zur Ableitung von Kriterien für unbemannte fliegende Plattformen.

[62] Begriff von (Kurbel 1989) übernommen.

„Der Begriff Knowledge Engineering wurde geprägt, um den Prozess zu beschreiben, wie menschliche Expertise extrahiert und derart kodifiziert wird, dass sie in einem Rechenprogramm verarbeitet werden kann.“ (Crasemann und Krasemann 1988)

extrahieren und dieses anschließend in eine Struktur zu überführen (indirekte Wissensakquisition). Die Experten sind dabei je nach betrachteter Detaillierungsebene Generalisten (Systembewerter) sowie Spezialisten (Piloten, Fachexperten). Die Konsensbildung beinhaltet die Aufstellung einer geeigneten Hierarchie von Fähigkeiten und Kriterien ohne Gewichtung, immer im Hinblick auf die zugrundeliegende Nutzenabsicht.

Die deskriptiven Kriterien als Teil der Wissensbasis wurden durch die Anwendung des beschriebenen Ansatzes[63] mit Fachleuten aufgebaut, welche aus Piloten, Bewertern bzw. Entscheidungsträgern und Experten aus unterschiedlichen technischen Bereichen bestanden. Ein Ausschnitt der ermittelten Kriterienstruktur für den Bereich der *Abbildenden Aufklärung am Boden* – welcher der *Aufklärung* als Fähigkeitsdomäne untergeordnet ist – ist in Abbildung 19 dargestellt. Zum Aufbau dieser Struktur wurden bspw. die Kriterien aus (Blasch et al. 2004; Fraker et al. 2008) einbezogen. Die erste Ebene des Kriterienblocks (*Measure of Effectiveness*) gliedert sich in die *Genauigkeit* (*accuracy*), die *Zuverlässigkeit*

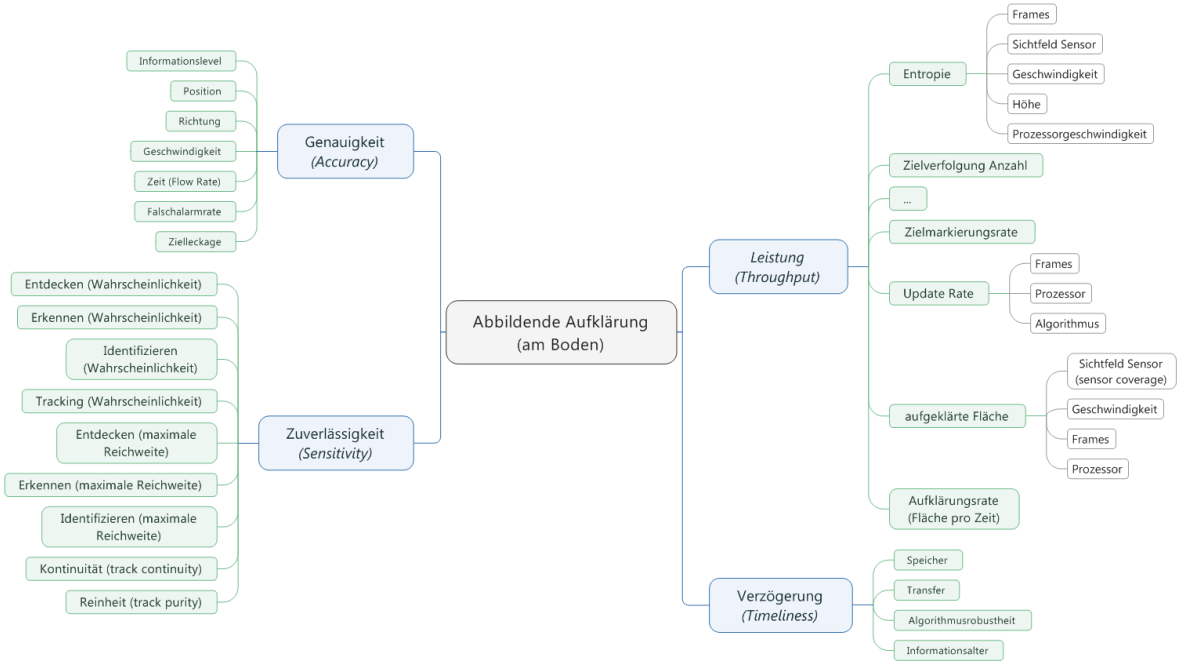


Abbildung 19: Ausschnitt aus der Kriterienstruktur für den Bereich der Abbildenden Aufklärung. *Der Fähigkeitsbaustein „Abbildende Aufklärung" zerfällt auf der MoE-Ebene bspw. in die Aufklärungsleistung, deren Kriterien auf der MoP-Ebene mit implementierten Berechnungsmodulen quantifiziert werden können.*

[63] Zum Aufbau der Struktur kann allgemein zwischen dem *Top-down-Ansatz* und *Bottom-up-Ansatz* unterschieden werden. Beim *Top-down-Ansatz* wird die Zielhierarchie von oben nach unten durch die Aufspaltung in Unterziele entwickelt. Dabei wird ausgehend von einem Oberziel erörtert, welche Aspekte für die Qualität der Entscheidung wichtig sind und welche Untergliederungen sich für die entsprechende Entscheidungssituation eignen. Der *Top-down-Ansatz* wird angewandt, wenn wichtige Aspekte bereits bekannt sind und der Entscheider damit einen Überblick über die Struktur des Problems hat (Rohr 2004). Bei Problemen, deren Struktur neu und unbekannt ist, bietet sich nach (Rohr 2004) der *Bottom-up*-Ansatz an. Generell werden in der Praxis beide Ansätze parallel verfolgt (Eisenführ et al. 2010), so auch in dieser Arbeit.

(*sensitivity*), die *Leistung* (*throughput*) und die *Verzögerung* (*timeliness*). Die *Leistung* zerfällt auf der *Measure of Performance* Ebene bspw. in Kriterien wie die *Entropie* und die *Aufklärungsrate*. Beide Kriterien werden später in Kapitel 4.3.1.2 genauer betrachtet. Die Kriterien dieser Ebene zerfallen wiederrum auf der letzten Kriterienebene (*Measure of Parameter*) in einfache Systemparameter wie die *Framerate* des Sensors oder das *Sichtfeld* des Objektivs. Dabei ist zu erwähnen, dass die betrachtete *Leistung* keine Aussage über die *Zuverlässigkeit* des Missionssensors beinhaltet. Die *Zuverlässigkeit* beinhaltet sowohl Kriterien für die Wahrscheinlichkeit einer Entdeckung, Erkennung oder Identifizierung als auch die zugehörigen Reichweiten. Zusätzlich werden noch Kriterien für die Zielverfolgung (*Tracking*) berücksichtigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die letzte Parameterebene nicht vollständig dargestellt.

4.2.2 Gewichtung und Skalierung

Die Datenbasis dieser Arbeit besteht neben den Kriterien (siehe letztes Kapitel 4.2.1) aus deren Gewichtungen und entsprechenden Wertfunktionen (siehe Abbildung 20). In der Entscheidungstheorie werden letztere auch als *Präferenzen* bezeichnet. Diese beschreiben, welche Wertigkeit bzw. welchen Vorzugswert eine Ausprägung eines Kriteriums erhält. Die Ermittlung dieser Präferenzen findet in dieser Arbeit durch eine Wissensakquisition statt, bei welcher der Experte über eine Akquisitionskomponente (siehe Kapitel 5.2.4) direkt mit dem DSS kommuniziert.

Nach (La Rocca und van L. Tooren 2009) sollten neben den objektiven Verfahren auch subjektive Einflüsse zugelassen werden, um eine ET-orientierte Lösung herbeiführen zu können. Diese subjektiven Parameter sollen im Folgenden betrachtet und deren methodischer Kontext erläutert werden.

4.2.2.1 Gewichtungsverteilung

Die Relevanz einer Fähigkeit oder eines Kriteriums für die Erfüllung einer Mission werden über Gewichtungen ausgedrückt (Choo et al. 1999). Die Gewichtungsverteilung ist in aller Regel nicht fest – d.h. jederzeit abrufbar – im Kopf des ET bzw. Experten vorhanden. Sie muss durch eine geschickte Befragungstechnik oder entsprechende Methoden sorgfältig elizitiert werden. Dazu stellt die Literatur eine Vielzahl von subjektiven und objektiven Methoden bereit (Pöyhönen und Hämäläinen 2001; Roszkowska 2013; Zardari et al. 2015), welche unterschiedliche Eignungen aufweisen.

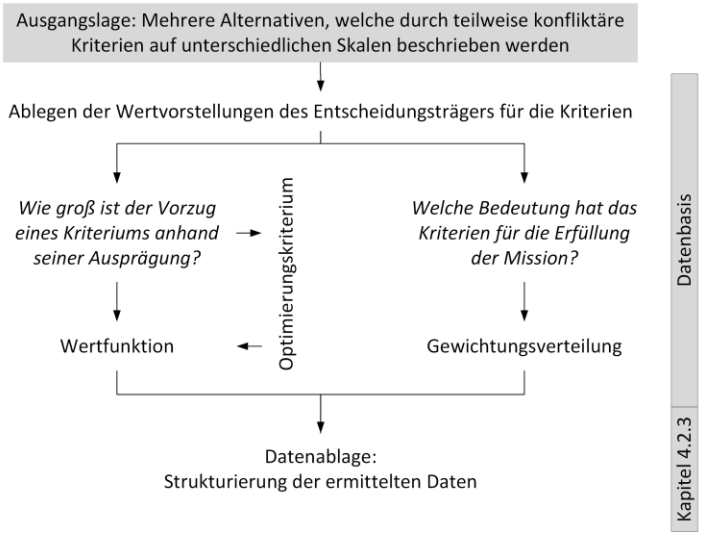


Abbildung 20: Ableitung der Entscheidungsrelevanten Parameter für die Entscheidungstheorie. *Es sind Gewichtungen sowie Wertfunktionen (Präferenzen) zu ermitteln, damit diese später mit MCDA- Methoden zu einem Gesamtergebnis aggregiert werden können.*

Eine Übersicht der Methoden aus der Literatur ist in Tabelle 6 aufgeführt. Weitere Einteilungen lassen sich bspw. nach statistisch oder mathematisch, holistisch oder spezialisiert sowie direkt oder indirekt vornehmen (Weber und Borcherding 1993). Die subjektiven Methoden bestimmen die Gewichtungen anhand der Wertvorstellungen des ET und sind die meist verwendeten Methoden bei der Bewertung von Luftfahrzeugen. Die objektiven Methoden wenden mathematische Vorgehen zur Analyse von Anfangsdaten an, was die Ermittlung der Gewichtungsverteilung nebulös macht (Zardari et al. 2015). Diese Anfangsdaten sind bspw. die Bandbreite der Kriterienausprägungen, wobei einem Kriterium ein umso höheres Gewicht zugeordnet wird, je höher die Unterschiede in der Ausprägung der Kriterien sind (Oberschmidt 2010). Bei diesen Methoden wird die Möglichkeit der Berücksichtigung subjektiver Wertvorstellungen eingeschränkt bzw. ausgeschlossen. Dadurch, dass diese objektiven Verfahren die subjektiven Informationen der ET gänzlich vernachlässigen, werden diese Verfahren für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Daher soll sich im Folgenden ausschließlich auf die subjektiven Verfahren konzentriert werden (daher sind die objektiven Methoden in Tabelle 6 grau hinterlegt). Eine nahezu vollständige Darstellung der existierenden Methoden ist bspw. in (Eisenführ et al. 2010; Nitzsch 2011; Zardari et al. 2015) zu finden.

Verfahren	
Subjektiv	**Objektiv**
Equal Weight Methode	Entropy Methode
Direct Rating Methode	Multi-objective optimization Methode
SIMOS Methode	Multiple correlation coefficient
Simple Multi-Attribute Rating (SMART)	Principal component analysis Methode
Analytical Hierarchy Process (AHP)	Methode der Standardabweichungen
Trade-Off Methoden	CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)
Direct Ranking Methode	wird vernachlässigt
LINPAC (LINear ProgrAmming of preference Comparison)	

Tabelle 6: Überblick über Gewichtungsmethoden. *Die Gewichtungsmethoden können allgemein in zwei Kategorien aufgeteilt werden. Bei den objektiven Methoden wird die Gewichtungsverteilung mit mathematischen Methoden abgeleitet und der ET hat keinen Einfluss auf die relative Gewichtung. Die objektiven Verfahren werden zur methodischen Ableitung der Gewichtungsverteilung ausgeschlossen, weshalb diese grau hinterlegt sind.*

Die Grundlagen zu den subjektiven Methoden sind im Anhang aufgeführt. An dieser Stelle soll sich auf die Auswahl der Methoden konzentriert werden. Dazu wird die konzeptionelle Anforderung an die Gewichtungsermittlung A5.1 (*Methodische Ableitung einer missionsorientierten Gewichtungsverteilung und […]*) weiter dekomponiert.

A5.1.1 Strukturierte Reduktion der Komplexität:
Durch die Vielzahl zu betrachtender und zu gewichtender Kriterien sind diese dem ET portioniert zu präsentieren. Andernfalls findet eine Überforderung statt und es können keine missionsorientierten Gewichtungen abgeleitet werden.

A5.1.2 Prüfung der Konsistenz der Gewichtungsverteilung:
Die Angaben der Wichtigkeiten sollen konsistent sein. Dies trifft vor allem auf ordinale Methoden zu. Inkonsistente Wertvorstellungen bilden keine Grundlage für ein plausibles und

nachvollziehbares Bewertungsergebnis. „*Bei Entscheidungen mit geringer Konsistenz handelt es sich mehr oder weniger um Zufallsentscheidungen. Konsistenz ist daher ein Maß für die Qualität einer Entscheidung*“ (Rohr 2004).

A5.1.3 Nutzerorientierte Anpassung der Verteilung:
Nach der ordinalen Gewichtungsverteilung ist die Möglichkeit vorzusehen, dass eine nachträgliche Feinanpassung durch den ET vorgenommen werden kann. Damit lassen sich detailliertere Wertvorstellungen abbilden.

Eine Gegenüberstellung der Methodeneigenschaften mit den definierten Anforderungen ist in Tabelle 7 dargestellt. Darin zeigt sich, dass *Fuzzy AHP* diese am besten erfüllt. Eine umfangreichere Übersicht verschiedener Methoden inkl. deren Vor- und Nachteile sind im Anhang zu finden. Das Verfahren der *Equal Weight Method* gilt als sehr präzise und einfach, allerdings wird es mit steigender Zahl der Kriterien für den ET nicht mehr beherrschbar. Weiterhin ist es für den ET schwierig, exakte numerische Werte für die Gewichtungen der Kriterien anzugeben. Aus diesem Grund sind Methoden zu bevorzugen, welche sich auf Paarvergleiche beziehen und die kognitiven Fähigkeiten des Menschen berücksichtigen.

Die klassischen Ranking Verfahren wie die *Trade-Off*, *SWING* und *SMART* Methode liefern generell einen zufriedenstellenden Ansatz für die Ermittlung von Gewichtungen (Malczewski 1999). Allerdings sind diese Ansätze bei der Betrachtung einer Vielzahl von Kriterien aufgrund der eingeschränkten theoretischen Fundierung zur Erhebung der Gewichtung nicht geeignet. Die vermeintlich einfachen Vorgehen stellen in Wirklichkeit deutlich höhere Anforderungen an den ET. Die einzelnen Nachteile dieser Vorgehen können in (Zardari et al. 2015) nachgelesen werden. Für die Anwendung zur Gewichtungsfindung im Rahmen der Bewertung von luftgestützten Systemen sollte der besondere Vorteil dieser Verfahren – nämlich die Gewichte in so einfacher Form über Punktbewertungen zu generieren – eher als Nachteil gesehen werden, da die Qualität und Verlässlichkeit der gewonnenen Gewichtungen vielmehr reduziert wird.

	A5.1.1	A5.1.2	A5.1.3
Equal Weight	-	-	o
Ranking	-	-	-
Simos	-	-	+
Direct Rating	o	-	o
AHP	+	+	-
Fuzzy AHP	+	+	o

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Konzeptanforderungen für die Gewichtungsermittlung mit den Methoden. *Der Fuzzy AHP Ansatz erfüllt die gesetzten Anforderungen am besten. (+: erfüllt, -: nicht erfüllt, o: teilweise erfüllt, ka: keine Aussage möglich)*

In nutzentheoretisch basierten Modellen werden die Gewichtungen klassischerweise basierend auf den ordinalen Paarvergleichen mit den ET abgeleitet. Das weit verbreitetste Verfahren ist der *AHP*, welcher sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien einbindet (Bogaschewsky et al. 2010). Die Fähigkeit der Berücksichtigung nicht direkt messbarer Größen verschaffte dem *AHP* eine Vielzahl an Anwendungen bei der Bewertung luftgestützter Systeme (Curran et al. 2011; Dožić und Kalić 2014; Gkirgkis et al. 2017). Ein Kritikpunkt des *AHP* ist die Annahme, dass der ET seine Wertvorstellungen nicht exakt und korrekt formulieren kann. Daher scheint auf Basis dieser Unsicherheit des ET eine Formulierung mit linguistischen Variablen angezeigt, welche neben den klassischen ordinalen Paarvergleichen des *AHP* eine zusätzliche Abstufung der Wichtigkeit ermöglicht. Einen solchen Ansatz bietet der *Fuzzy Analytic Hierarchie Process* (FAHP), welcher ein Werkzeug zur Formulierung von natürlichen Ungenauigkeiten bereitstellt. Dabei beinhaltet der *FAHP* alle klassischen Vorteile des *AHP*. Diese werden durch den Einsatz

linguistischer Variablen ergänzt, welche dem ET eine intuitive Bewertung der zugrundeliegenden Kriterien ermöglicht (Bogaschewsky et al. 2010). Problematisch ist allerdings weiterhin die diskrete Ermittlung der Abstände zwischen den Gewichtungsrängen. Der *FAHP* bietet zwar bereits die Möglichkeit, diese Abstände detaillierter zu ermitteln (im Vergleich zum *AHP*), allerdings nur auf diskreten Abstufungen.

Um stetige Anpassungen der Abstände vornehmen zu können (A5.1.3), ist ein hybrider Ansatz aus *FAHP* und der *SIMOS* Methode gewählt worden. In abschließender Betrachtung lässt sich feststellen, dass damit ausgehend von der ermittelten Gewichtungsverteilung eine Korrektur mittels einer stetigen Anpassung der Abstände erfolgen kann, was schlussendlich zu einer eindeutigen Abbildung der Gewichtungen führt.

Zur Zwischenvalidierung dieses kombinierten Vorgehens wurde eine softwaregestützte Testanwendung erstellt, in welcher 30 Kriterien auf zwei Ebenen zu gewichten waren. Vier Testpersonen hatten die Aufgabe, die Gewichtungen sowohl mit der *Equal Weight Method* als auch mit der *FAHP+SIMOS* Methode zu ermitteln. Anschließend wurden die ermittelten Gewichtungen verglichen und die Testpersonen hatten Fragen bzgl. der *Nützlichkeit* und *Anwendbarkeit* beider Methoden zu beantworten. Es zeigte sich, dass die ermittelten Gewichtungen beider Methoden nicht übereinstimmten. Die Experten waren mit der *Equal Weight Method* nicht in der Lage, konsistente Gewichtungen mit expliziten Werten zu bestimmen. In Tabelle 8 ist ein Ausschnitt der subjektiven Antworten der Testpersonen bzgl. der Tauglichkeit der beiden Methoden aufgeführt. Die Testpersonen vertrauten den Ergebnissen der *FAHP+SIMOS* (M2) deutlich mehr als denen der *Equal Weight Method* (M1). Die Ergebnisse von M2 sind gleichzeitig deutlich nachvollziehbarer und allgemein würden die Testpersonen M2 zur Gewichtungsfindung deutlich bevorzugen.

	Ich habe großes Vertrauen in die Ergebnisse der angewandten Methode				
	trifft vollkommen | überhaupt nicht zu				
M1			●	●●	●
M2	●●●	●			
	Die ermittelten Gewichtungen sind deutlich nachvollziehbar				
	trifft vollkommen | überhaupt nicht zu				
M1			●●	●	●
M2	●●	●●			
	Ich würde M2 bevorzugen				
	trifft vollkommen | überhaupt nicht zu				
	●●●●				

Tabelle 8: Ergebnisse der Teststellung für die Methoden zur Gewichtungsfindung. *Die Punkte verdeutlichen die Antworten der einzelnen Testpersonen. Es zeigt sich, dass die adaptierte Methode (M2) eine erhebliche Verbesserung gegenüber dem gängigen Vorgehen (M1) darstellt.*

4.2.2.2 Skalierung der Kriterienausprägungen: Wertfunktionen

Im vorherigen Kapitel wurde die Ermittlung der Kriteriengewichtungen beschrieben. Diese beschreibt die entsprechende Wichtigkeit eines bestimmten Kriteriums bzw. einer Fähigkeit (Kapitel 4.2.1.1) zur Erfüllung der Mission(en). Neben diesen kriterienspezifischen Gewichtungen sind auch die Ausprägungen der einzelnen Alternativen in diesem Kriterium relevant. Dabei präferiert der ET grundsätzlich eine Ausprägung gegenüber einer anderen (Eisenführ et al. 2010), bspw. werden niedrige Kosten oder höhere

Leistungswerte bevorzugt. Um diese Vorzüge auszudrücken, werden Wertfunktionen[64] definiert, welche einer Alternative für ein *Elementares Kriterium* – bezogen auf die Ausprägung in diesem Kriterium – eine reelle Zahl zuordnen [0,1] (Rohr 2004). (Rehkugler und Schindel 1990) definieren diese Präferenz als *„die relative Vorziehenswürdigkeit einer Ergebnismenge gegenüber einer anderen in der Wertschätzung eines bestimmten Entscheidungsträgers."* Dabei wird die Präferenz durch ein zugehöriges Optimierungskriterium ausgedrückt (siehe Abbildung 20) (Bartusseck 2008). Nach (Laux et al. 2014) können diese Optimierungskriterien durch:

- Maximierung: maximalste Ausprägung ist zu bevorzugen (Flug- oder Aufklärungsleistung)
- Minimierung: minimalste Ausprägung ist zu bevorzugen (Kosten oder Zeiten; außer Ausdauer)
- Satisfizierung: Anstreben einer bestimmten Größe für die Ausprägung (Anzahl der Zieldarstellung im Radar)
- Fixierung: Anstreben eines genau fixierten Wertes für die Zielgröße (*Constraint* wie bspw. Nutzlast)

beschrieben werden. Dabei hat jedes Kriterium eine eigene Optimierungsvorschrift. Während *Kosten* üblicherweise zu minimieren sind, werden *Leistungsfähigkeiten* maximiert. Multikriterielle ET-Methoden setzen dabei eine kriterienspezifische Wertfunktion voraus.

In der modernen *Präskriptiven Entscheidungstheorie* (siehe Kapitel 2.1.1.3) werden diese Präferenzen mit Funktionen abgebildet, die jeder Alternative eine reelle Zahl in Form eines Nutzen- oder Vorzugswertes zuordnet. Diese Funktionen werden je nach methodischen Kontext (Methode der Entscheidungstheorie) als *Wertfunktion* (Nutzen- und Präferenzfunktion) bezeichnet und stellen eine Skalierung der Kriterienausprägung dar. Einzelne MCDA- Methoden nutzen dabei unterschiedliche *Wertfunktionen*, welche auch eine unterschiedliche Skalierung durchführen. So verwendet die Nutzwertanalyse (Kapitel 4.3.2.1) sogenannte *Nutzenfunktionen*, welche die Ausprägung einer Alternative direkt in einen Nutzenwert überführen. Dies wird in Abbildung 21 verdeutlicht. Beispielsweise wird bei der *Aufgeklärten Fläche/Zeit* davon ausgegangen, dass der ET eine hohe Ausprägung einer niedrigeren vorzieht (Maximierung), während bei der *Falschdetektion* eine niedrige Ausprägung (Minimierung) bevorzugt wird. Anhand der Nutzenfunktion wird die Ausprägung des jeweiligen Kriteriums in einen entsprechenden Nutzenwert überführt. Aus Abbildung 21 wird deutlich, dass die Skalierung der Abszisse – auf welcher die Ausprägung für das entsprechende Kriterium aufgetragen ist – einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf der Nutzenfunktion und damit auf den Nutzenwert selbst hat. Die Skala kann dabei entweder durch globale Referenzwerte (bspw. Anforderungen; maximale Reichweite = 5000km) oder durch die Werte der besten und schlechtesten betrachteten Alternative definiert werden.

Andere Methoden – wie bspw. *Promethee* (siehe Kapitel 4.3.2.3) – betrachten hingegen nicht die absoluten Ausprägungen auf der Abszisse, sondern die Differenz von zwei Ausprägungen. Dies ist darin begründet, dass diese Methode auf paarweisen Vergleichen beruht und damit auch Unvergleichbarkeiten

[64] Die *Wertfunktion* ist eine Funktion, welche jeder Alternative A eine reelle Zahl zuordnet, dass der Wert einer Alternative A genau dann größer als der Wert einer Alternative B ist, falls der Entscheider A gegenüber B präferiert (Eisenführ et al. 2010).

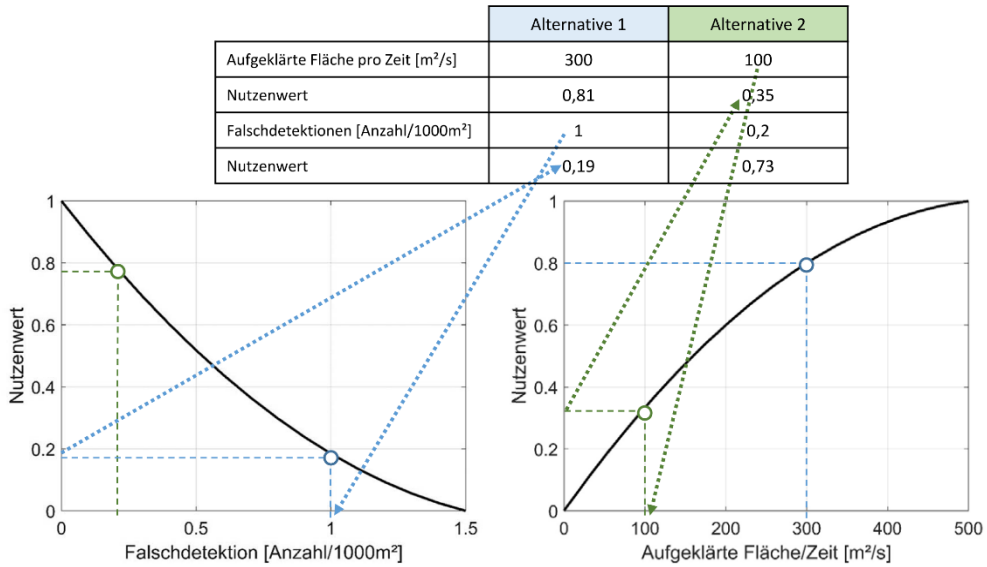


Abbildung 21: Ableitung der Nutzenwerte aus den Ausprägungen mit entsprechenden Nutzenfunktionen. *Ausgehend von den Präferenzen des ET bzw. der Fachexperten werden Funktionen formuliert, welche die Ausprägungen der Kriterien in entsprechende Werte überführen.*

berücksichtigen kann. Die *Wertfunktionen* dieser Methoden werden entsprechend *Präferenzfunktion* genannt und können folgende Relationen beinhalten:

- Strikte Präferenzrelation: Strikter Vorzug einer Ausprägung (A>B)
- Indifferenzrelation: Zwei Ausprägungen werden als gleichwertig angesehen (A~B)
- Schwache Präferenzrelation: schwacher Vorzug einer Ausprägung
- Unvergleichbarkeiten: Ausprägungen sind nicht miteinander vergleichbar

Eine entsprechende Präferenzfunktion für das Kriterium *Instationäre Wenderate* ist in Abbildung 35 (siehe Kapitel 4.3.2.3) aufgeführt und erläutert.

Da diese Wertfunktionen nicht von Anfang an bekannt sind, wird zur Unterstützung von Entscheidungen bei mehreren Zielen vorausgesetzt, dass diese bzgl. eines Ziels formuliert und abgebildet werden können. Die Wertvorstellung sollte dabei vollständig und transitiv[65] sein. Dabei wird meist eine Unabhängigkeit gefordert, welche zahlreichen klassischen Entscheidungsverfahren zugrunde liegt. Dies beschreibt, dass der ET oder die Experten in der Lage sein sollten, ihre Wertvorstellungen bzgl. eines Kriteriums unabhängig von der Ausprägung der übrigen Kriterien zu formulieren[66].

[65] Da Werte reelle Zahlen sind und „>“ eine transitive Ordnung auf den reellen Zahlen darstellt, müssen die Präferenzen auch transitiv sein (Eisenführ et al. 2010). Das Transitivitätsaxiom wird erfüllt, wenn sich aus A>B und B>C die Folgerung A>C ergibt.

[66] Ein bekanntes Beispiel für eine Entscheidungssituation mit Präferenzabhängigkeit ist die Wahl des Weins zu einem Essen. Die Entscheidung für Weiß- oder Rotwein wird abhängig von der Wahl des Essens (Fleisch oder Fisch) ausfallen.

In der Literatur gibt es unterschiedliche Methoden zur Ermittlung solcher Wertfunktionen (Winterfeldt und Edwards 1993; Farquhar und Keller 1989) wie bspw. die *Direct-Rating-Methode*, die *Difference Standard Sequence Technique* (Methode gleicher Wertdifferenzen) oder die *Bisection Technique* (Halbierungsmethode). Sie dienen dazu, den jeweiligen Alternativen entsprechende reelle Zahlen zuzuordnen, wozu der ET bzw. Experte nur mäßig in der Lage ist (siehe Kapitel 2.2.2). Daher wurden zur stetigen Formulierung der Präferenzen gängige Funktionen vorgegeben (vgl. Kapitel 4.3.2.3). Zusätzlich wurde eine benutzerdefinierte Formulierung der Funktion vorgesehen, so dass ein beliebiger *Spline* definiert werden kann. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Experten diese Funktionen für die Kriterien definieren können. Auf Grundlage der fachlichen Expertise der Experten bzw. des ET kann ihnen zugemutet werden, deren Wertvorstellungen bzgl. der Ausprägungen eines speziellen Kriteriums entsprechend abzubilden.

4.2.3 Strukturierung der Datenbasis

Zur Verwaltung der Vielzahl an entscheidungsrelevanten Parametern ist es notwendig, diese mit einer geeigneten Methode zu strukturieren und abzulegen. Im Folgenden sollen nur Strukturierungsmethoden für Auswahlentscheidungen gesichtet und untersucht werden. Methoden für die Auswahl von Handlungsempfehlungen wie Entscheidungsbäume oder Entscheidungsnetze bzw. semantische Netze (Recke 2005) werden nicht betrachtet.

Zur Strukturierung der Daten in einem Entscheidungsproblem stellt (Müller-Herbers 2007) Methoden wie *Checklisten* und *Entscheidungsmatrizen* vor, welche im Folgenden näher erläutert und hinsichtlich deren Eignung zur Strukturierung der Datenbasis im MDP bewertet werden. Weitere klassische Methoden wie *Mindmaps* (Klein 2004) oder *Pivot-Tabellen* wurden ebenfalls gesichtet.

4.2.3.1 Mindmap

Mit einer Mindmap können Inhalte gesammelt und aufgezeichnet werden. Dazu werden Haupt- und Nebenäste gebildet (Klein 2004). Ein Beispiel für eine Mindmap ist in Abbildung 15 (siehe Kapitel 4.2.1) dargestellt. Darin wird eine Struktur in Form einer Hierarchie oder eines Baumes aufgebaut, welche in der Summe die betrachtete Kriterienhierarchie abbilden kann. Allerdings ist diese Form der Strukturierung speziell für die Wissensakquisition und Ideenfindung vorgesehen, so dass es nicht möglich ist, weitere entscheidungsrelevante Parameter abzulegen. Aus diesem Grund soll die Mindmap an dieser Stelle mit aufgeführt, allerdings für die Strukturierung der gesamten Datenbasis nicht berücksichtigt werden. Gleichwohl wurde die Mindmap zur Strukturierung der Kriterienhierarchie in der Wissensakquisition genutzt, wie in Kapitel 4.2.1.2 bereits beschrieben.

4.2.3.2 Checklisten

„*Checklisten sind eine der einfachsten Möglichkeiten, entscheidungsrelevante Aspekte von Lösungsvarianten übersichtlich darzustellen*“ (Müller-Herbers 2007). Sie bilden Kataloge von zu berücksichtigenden Aspekten, nach denen Alternativen überprüft werden können (Müller-Herbers 2007). In den Checklisten können die betrachteten Kriterien gesammelt, zusammengestellt und in unterschiedlicher Tiefe gegliedert werden. Erweiterte Checklisten können auch bereits die Messung oder Einschätzung bzgl. der

Erfüllung der Kriterien enthalten (Müller-Herbers 2007). Diese Ansätze sind schnell und einfach handhabbar und besitzen nach (Müller-Herbers 2007) eine individuelle Anpassungsmöglichkeit an unterschiedliche Arten von Daten (qualitativ, quantitativ).

Als Variante der Checklistenmethode kann die Pro- Kontra- Analyse aufgefasst werden. Dabei wird eine vergleichende Gegenüberstellung der Für- und Widerargumente durchgeführt. Dieses Vorgehen wird allerdings als unstrukturierte Form des Checklistenverfahrens verstanden (Werani 2004) und soll nicht weiter beleuchtet werden.

4.2.3.3 Pivot Tabelle

„Eine Pivot-Tabelle ist ein mächtiges Instrument, um Daten, die in Tabellenform vorliegen, strukturiert auszuwerten."[67] Ziel ist der Zugewinn an Übersichtlichkeit durch die Darstellung wichtiger Eigenschaften der Daten. Die Darstellung ist wie eine Matrix in Zeilen und Spalten aufgeteilt. Dabei können die Daten allerdings in mehreren Dimensionen analysiert werden. Die Tabellen eignen sich besonders zum Extrahieren, Summieren und Aggregieren relevanter Daten aus großen Datenmengen[68], wodurch ein Einsatz als Strukturierungsmethode möglich erscheint.

Ein Beispiel für die Anwendung einer solchen Tabelle ist in Abbildung 22 dargestellt. Links ist die unstrukturierte Datenmenge gezeigt, welche rechts systematisch zusammengefasst wurde. Damit lassen sich relevante Informationen extrahieren und übersichtlich darstellen, während unwichtige Daten verborgen bleiben. Dargestellt sind die Flugstunden pro Pilot, Flughafen und Jahr. Diese Daten können rechts entsprechend aufbereitet angezeigt werden. Dazu wurden alle Piloten ausgewählt und die Flugstunden pro Flughafen aufsummiert. Dies ist ein Beispiel der Strukturierung, wodurch die Komplexität reduziert werden kann.

Pilot	Standort	Jahr	Flugstunden
Müller	Manching	2016	50
Meier	Rostock	2016	80
Schulze	Neuburg	2016	140
Mustermann	Wittmund	2016	90
Meier	Rostock	2017	35
Schulze	Manching	2017	78
Müller	Rostock	2017	94
Mustermann	Neuburg	2017	199
Mustermann	Wittmund	2018	46
Müller	Manching	2018	89
Schulze	Neuburg	2018	111

Pilot	(Alle)

Standort	Flugstunden
Manching	217
Rostock	209
Neuburg	450
Wittmund	136
Gesamt	**1012**

Abbildung 22: Pivot Tabelle. *Die linke Tabelle zeigt die unstrukturierte Datenmenge von Flugstunden der Piloten abhängig von Ort und Jahr. Die rechte Pivot Tabelle zeigt eine geordnete Darstellung der relevanten Daten (von Nutzer ausgewählt) und kann damit eine übersichtliche Darstellung durch Reduzierung der Datenmenge erreichen.*

[67] https://www.pivot-tabelle.de/, zuletzt besucht am 02.09.2018

[68] https://www.microtool.de/projektmanagement/mit-einer-pivot-tabelle-daten-analysieren/, zuletzt besucht am 02.09.2018

4.2.3.4 Entscheidungsmatrix

„Matrizen können als Weiterentwicklung der Checklisten und ihrer Darstellung in Wertprofilen[69] *gesehen werden"* (Müller-Herbers 2007). Die Entscheidungsmatrix basiert auf einer Tabelle/Matrix mit all den betrachteten Alternativen sowie den entsprechenden Kriterien, welche eine Entscheidung beeinflussen können. Anschließend werden die Kriterien für jede betrachtete Alternative bewertet.

Allgemein wird die Entscheidungsmatrix als klar strukturierte und übersichtliche Methode verstanden, um verschiedene Vorgehensweisen bzw. Handlungsoptionen zu planen und darüber zu entscheiden. Gleichzeitig kann mit einer solchen Matrix auch eine Entscheidung bzgl. der Auswahl eines technischen Systems unterstützt werden. Eine beispielhafte Entscheidungsmatrix ist in Tabelle 9 dargestellt. Die Kriterien sind in den Zeilen und die Alternativen in den Spalten aufgeführt. In den Zellen werden die Zeilen und Spalten über sogenannte Erwartungswerte *e* verknüpft, welche durch entsprechende Regeln (Wertefunktionen, siehe Kapitel 4.2.2.2) aus den tatsächlichen Ausprägungen abgeleitet werden. Sind in den Zellen die tatsächlichen Ergebnisse aufgeführt, wird die Matrix als Ergebnismatrix bezeichnet.

	w	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Kriterium 1	w_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}
Kriterium 2	w_2	e_{21}	e_{22}	e_{23}
Kriterium 3	w_3	e_{31}	e_{32}	e_{33}

Tabelle 9: Entscheidungsmatrix. *Die qualitative Entscheidungsmatrix zeigt den Erwartungswert (Zelle) zu den Kriterien (Zeile) und den Alternativen (Spalte).*

Die Präferenzen (Vorzug) des ET werden im Modell in Entscheidungsregeln umgewandelt. Bspw. wird für ein Kriterium ein möglichst hoher Wert präferiert, während für ein anderes Kriterium ein möglichst niedriger Wert angestrebt wird (Bartusseck 2008). Je nach Entscheidungsverfahren sind Gewichtungen für die Kriterien zu spezifizieren und zu berücksichtigen. Um die beste Alternative aus den Handlungsmöglichkeiten auszuwählen, stehen verschiedene Lösungsverfahren (z. B. Optimierungsverfahren, Satisfizierungsverfahren) zur Verfügung. Andere Bezeichnungen für eine derartige Matrix sind die *Datentabelle* (Strassert 1995) und aus dem amerikanischen Raum die *scorecard* (Müller-Herbers 2007). Eine spezielle Form der Entscheidungsmatrix ist die *Pugh*-Matrix (Cervone 2009), welche ähnlich einer Pro-Contra Methode die Erfüllung der Kriterien binär mit Plus oder Minus beschreibt.

4.2.3.5 Quality Function Deployment / House of Quality

Das *Quality Function Deployment* (QFD) ist eine Methode zur Qualitätssicherung im Entwurfsprozess mit dem Ziel, die Kosten sowie die Entwicklungszeit bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität zu reduzieren (ReVelle et al. 1998). Dazu werden Kundenbedürfnisse in Anforderungen und weiter in technische Merkmale oder Prozesse überführt, um schlussendlich die Beziehungen zwischen den Anforderungen und den technischen Merkmalen des Systems bzw. der jeweiligen Komponenten zu verstehen. Daraus kann abgeleitet werden, bei welchen Systemfähigkeiten die unterschiedlichen

[69] Wertprofile dienen der Veranschaulichung der Ergebnisse – die in einer Checkliste mit Darstellung der Ausprägungen aufgelistet sind – in einer anderen graphischen Darstellungsform. Es gibt verschiedene Arten von Wertprofilen. (Müller-Herbers 2007)

Anforderungen bestmöglich erfüllt werden. Nach (Mavris et al. 2013) bietet QFD eine methodische Übersetzung der „*Stimme des Kunden*“ in die technischen Anforderungen des Designers.

Die grundlegende Methode dazu ist das *House of Quality* (HoQ), welches ein Mittel zur Planung und Kommunikation zwischen zwei Gruppen von Menschen mit unterschiedlichen Verantwortlichkeiten (Kunde und Ingenieur) darstellt. Die Methode des QFD und damit des HoQ ist ein bewährtes und umfassend praktiziertes Vorgehen im Flugzeugentwurf (Brandt 2015).

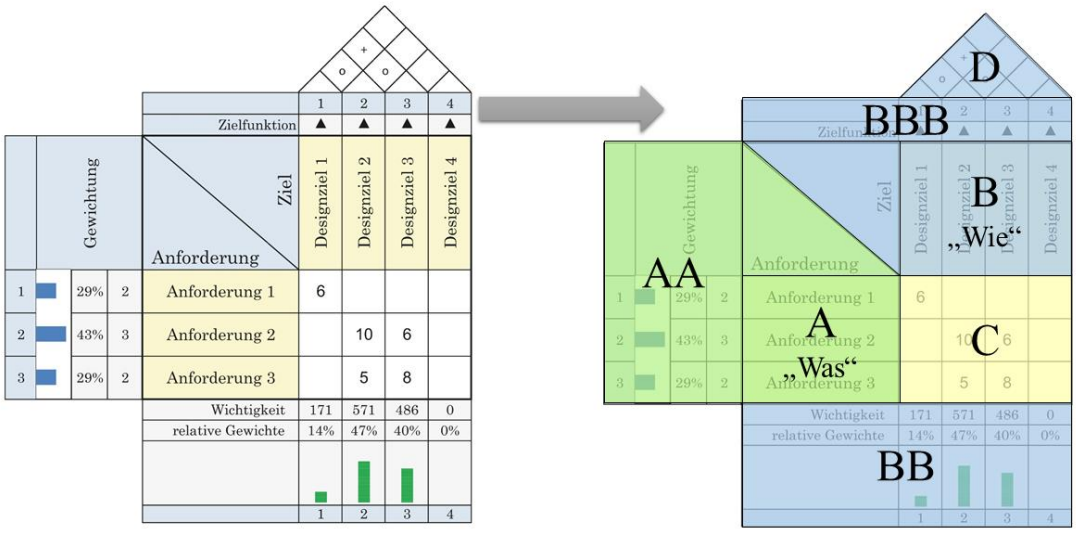


Abbildung 23: Bereiche des *House of Quality*. *Das HoQ besteht aus unterschiedlichen Bereichen, welche farblich und mit einem jeweiligen Buchstaben hervorgehoben sind. In dieser Darstellung werden Kundenforderungen den Designzielen gegenübergestellt und daraus die Wichtigkeit dieser Designziele abgeleitet. Aus diesen Designzielen werden anschließend die technischen Merkmale des Systems abgeleitet, was in dieser schematischen Darstellung allerdings nicht zu sehen ist.*

Das HoQ besteht aus unterschiedlichen Bereichen, welche in Abbildung 23 schematisch dargestellt sind. Die Kundenanforderungen werden im Bereich „A“ und die zugehörigen Designziele in Bereich „B“ definiert. Die Kundenanforderungen ergeben sich meist aus einer Zielgruppenanalyse und der Frage, „*Was*“ für diese Zielgruppe wichtig ist. Zusätzlich werden Gewichtungen auf einer entsprechenden Skala angegeben, welche im Bereich „AA“ aufgeführt sind. Die Designziele leiten sich daraus ab, „*Wie*“ die Kundenanforderungen erreicht werden können. Diesen werden Zielfunktionen zugeordnet, welche angeben, wann ein Designziel optimal in Bezug auf die Kundenanforderung ist. Beispielsweise ist für eine gute *Aufklärungsleistung* eines luftgestützten Systems die *Auflösung* zu maximieren, während für eine hohe *Ausdauer* im Einsatzgebiet der *Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch* zu minimieren ist. Diese Zielfunktionen werden im Bereich „BBB“ definiert und beziehen sich stets auf die Spalten des HoQ. Der Wohnraum des Hauses „C“ enthält die Korrelationen zwischen den Kundenanforderungen und den Designzielen. Diese Abhängigkeiten beschreiben, wie stark sich die Erfüllung eines Designziels auf die Kundenanforderung auswirkt oder anders gesagt, wie wichtig ein Designziel für die Berücksichtigung der Kundenanforderung ist. Dazu können ebenfalls verschiedene Skalen je nach Anwendungsbereich genutzt

werden[70]. Somit kann für jedes Designziel dessen Relevanz durch Multiplikation der Gewichtung für die Kundenanforderung und der jeweiligen Abhängigkeiten zu den Designzielen berechnet werden. Diese absolute und relative Gewichtung der Designziele wird im Keller des Hauses „BB“ hinterlegt. Im Dach „D“ werden Wechselwirkungen zwischen den Designzielen definiert. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, dass sich einzelne Ziele gegenseitig begünstigen oder ausschließen. Ein Beispiel wäre eine hohe *Ausdauer* eines Kampfflugzeuges im Luftkampf (Abnutzungstaktik) bei gleichzeitiger hoher *Wenderate* und *Beschleunigungsleistung*. Beide Ziele schließen sich gegenseitig aus, da entweder die *Punktleistung* im Nachbrennerbetrieb oder aber die *Ausdauer* maximiert werden kann. Diese Wechselwirkungen werden ebenfalls mit einer entsprechenden Skala definiert. Sie dienen vorwiegend dazu, Kompromisse im Design frühzeitig zu erkennen, wobei diese in keiner Berechnung berücksichtigt werden (Mavris et al. 2013).

Innerhalb des QFD wird allerdings nicht nur ein HoQ betrachtet, welches die Kundenanforderungen auf Designziele abbildet. Ausgehend von diesen Designzielen werden weiterführend technische Merkmale des Systems bzw. der Komponenten abgeleitet. Dabei sind die Ergebnisse des vorherigen HoQ die Eingangsparameter für das Folgende auf einer tieferen Detailebene. Die Zeilen werden damit zu den Spalten (bspw. Designziele) und diese werden anschließend auf die Parameter der nächsten Ebene (technische Merkmale) abgebildet. Damit können bis auf die unterste Ebene die Wichtigkeiten der technischen Merkmale abgeleitet werden. Es findet allerdings keine Zuordnung der Ausprägung statt. Es wird ausschließlich die Relevanz der Erfüllung eines Merkmals in Bezug auf die Kundenwünsche betrachtet. Die hierarchische Abfolge des QFD Prozesses ist in Abbildung 24 dargestellt.

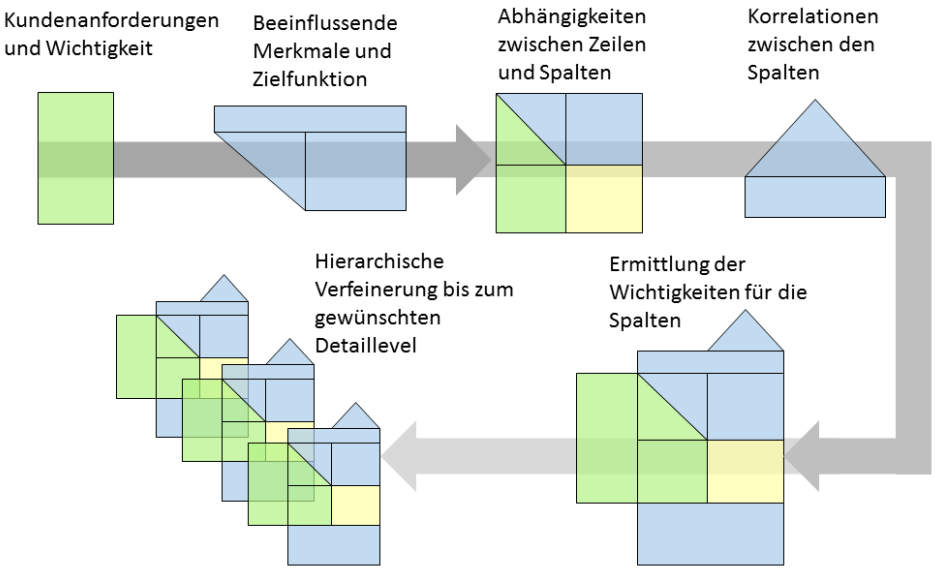


Abbildung 24: Hierarchischer Prozess des QFD bestehend aus mehreren HoQ. *QFD wurde mit dem Ziel entwickelt, die Wünsche der Kunden besser zu verstehen und in technische Produktmerkmale umzusetzen. Die Basis des QFD ist das HoQ, welches ein methodisches Vorgehen zur Ableitung von technischen Anforderungen darstellt. Diese Anforderungen werden über mehrere Hierarchieebenen abgeleitet, wodurch mehrere HoQ sequentiell abgearbeitet werden.*

[70] In (Park 1998) wurden 30 Arbeiten zu QFD untersucht und festgestellt, dass 17 eine 1-3-9 Skala, 5 eine 1-3-5 und 8 andere Skalen wie 1-5-9, 1-2-4 oder 1-6-9 nutzen. Daher gibt es laut (Cohen 1995) keinen wissenschaftlichen Ansatz zur Auswahl einer Abstufung.

(Dickerson und Mavris 2011) entwickeln eine Designumgebung *ROSE* zur Unterstützung des Variantenmanagements innerhalb der Trade-Off Analyse. Darauf aufbauend entwickelten (Mavris et al. 2013) und (Duncan et al. 2011) die Designumgebung *ROSETTA*, um eine direkte Verbindung zwischen dem QFD und den standardisierten Methoden des Variantenmanagements (*Multi Objective Decision Making*, Kapitel 2.1.1.3) herzustellen und damit Prognosen bzgl. der Technologienutzungen abzuleiten sowie den Konzeptentwurf zu unterstützen. Einen Ansatz zur Bestimmung der optimalen Anforderungen an ein Design wurde durch Nutzung und Anpassung des HoQ bei (Park 1998) vorgestellt.

4.2.3.6 Methodenbewertung

Um aus den beschriebenen Strukturierungsmethoden diejenige Methode zu isolieren, welche für die Nutzung innerhalb des *Mikro-Konzeptes* am geeignetsten erscheint, sollen zunächst Anforderungen an die Implementierung und Nutzung formuliert werden. Anschließend werden diese mit den gesichteten Methoden gegenübergestellt.

4.2.3.6.1 Anforderungen an die Implementierung

Für die Strukturierung lassen sich ausgehend von den vorher definierten Zielsetzungen des *Mikro-Konzeptes* einzelne Anforderungen an die Methode ableiten.

A1.3 *Missionsorientierung*: Berücksichtigung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien

Neben den Kriterien selbst sind weitere Daten strukturiert und übersichtlich abzulegen. Diese sind die entscheidungsrelevanten Parameter (Gewichtung, Ziele, Präferenzen) sowie eventuelle Korrelationen zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien und Abhängigkeiten.

A1.5 *Missionsorientierung*: Berücksichtigung der Wertvorstellungen des ET

Weiterhin ist es notwendig, dass die Methode eine Anpassung dieser Datenbasis durch den ET vorsieht.

A2.1 *Transparenz*: Strukturierung der zugrundeliegenden Datenbasis

Die Methode soll die Aufbereitung und Übersichtlichkeit der kompletten Datenbasis sicherstellen. Dazu ist eine Reduzierung der Komplexität durch eine entsprechende Aufteilung und Darstellungsform notwendig.

Auf Basis dieser Anforderungen werden im Folgenden die drei Methoden bzw. Vorgehen bewertet und deren Einsatz im *Mikro-Konzept* diskutiert.

4.2.3.6.2 Diskussion

Die *Checklistenmethode* sowie die *Entscheidungsmatrix* dienen zur Vorbereitung eines Entscheidungsprozesses. Dabei ist die *Checklistenmethode* am wenigsten geeignet, da diese ausschließlich die Kriterien und die Alternativen betrachtet und dabei eine Erfüllung bzw. Nichterfüllung eines Kriteriums wiedergibt. Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten ist ausgeschlossen (A1.3). Weiterhin können auch keine Gewichtungen oder Präferenzen hinterlegt werden. Die Methode als solche ist sehr transparent, was durch die begrenzte Datenrepräsentation begünstigt wird. Aus diesem Grund

kann die *Checklistenmethode* auch A2.1 nicht erfüllen. Eine Editierung der Datenbasis ist bei dieser Methode ebenfalls nicht vorgesehen, da die meisten editierbaren Daten nicht abgelegt werden können (A1.5).

Die *Entscheidungsmatrix* ist hingegen eine tabellarische Darstellungsform der Entscheidungssituation. Mit dieser Methode liegt eine vollständige Darstellung des Entscheidungsproblems vor, welches durch eine Entscheidungsregel gelöst werden kann[71]. Dies trifft allerdings nicht auf die Unterstützung bei komplexen Auswahlentscheidungen luftgestützter Systeme zu. Eine vollständige Darstellung des Problems kann nicht realisiert werden, da mit dieser Matrix nur die Gewichtungen berücksichtigt werden können. Dabei werden die Präferenzvorstellungen bestenfalls in Form von transformierten Ertragswerten wiedergegeben. Weiterführend ist eine Berücksichtigung der Wechselwirkungen und Abhängigkeiten ebenfalls nicht möglich (A1.3). Die Wertvorstellungen in Form von Gewichtungen und Präferenz können hingegen nutzerorientiert angepasst werden (A1.5). Die Datenbasis (ausgeschlossen Wechselwirkung und Abhängigkeiten) kann durch die tabellarische Form übersichtlich dargestellt werden, was allerdings mit steigender Anzahl zu betrachtender Kriterien verloren geht (A2.1).

Mit der *Pivot Tabelle* werden komplexe Daten reduziert dargestellt. Damit kann eine Strukturierung der Datenbasis vorgenommen werden. Nachteilig ist zu bewerten, dass die Datenbasis nicht alle notwendigen Parameter enthält, sondern hinsichtlich deren Umfang mit einer Entscheidungstabelle zu vergleichen ist. Dabei können ebenfalls keine Korrelationen innerhalb der Zeilen oder Spalten definiert werden. Eine genaue Hinterlegung von Präferenzen in Form von Vorzugswerten ist ebenfalls schwierig zu realisieren. Die *Pivot Tabellen* unterscheiden sich hinsichtlich der *Entscheidungsmatrizen* dadurch, dass beliebig viele Daten dargestellt werden können, wodurch eine Aufteilung der Darstellung hinsichtlich der einzelnen Ebenen der Kriterienstruktur realisiert werden kann. Dennoch stellt die reduzierte Möglichkeit zur Datenablage und der Informationsverlust durch die Komprimierung der Daten[72] einen Ausschluss dieser Methode dar.

Das *HoQ* kann als Weiterentwicklung einer *Entscheidungsmatrix* verstanden werden. Der Raum stellt die Matrix dar, während in den Dächern die Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien definiert werden können. Die Editierung von Abhängigkeiten ist nicht vorgesehen. Gleichwohl können die Daten durch einen Nutzer angepasst werden (A1.5). Die Darstellung sieht im Gegensatz zu der *Entscheidungsmatrix* vor, dass mehrere *HoQ* seriell aneinandergereiht werden, bis die komplette Kriterienstruktur über alle Ebenen dargestellt ist (siehe Abbildung 24). In jedem Haus sind damit die Eltern-Kind Beziehungen für eine Ebene gelistet, wodurch die Übersichtlichkeit trotz der Datenmenge gewahrt bleibt (A2.1). In Tabelle 10 ist die Erfüllung der einzelnen Anforderungen durch die jeweiligen Ansätze zusammengefasst. Es zeigt sich, dass keine Methode die Anforderungen komplett, allerdings das *HoQ* diese am besten erfüllt.

---

[71] https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/entscheidungsmatrix-33682, zuletzt besucht am 13.08.2018
[72] https://www.pivot-tabelle.de/, zuletzt besucht am 14.06.2018

In einer Arbeit von (Delano et al. 2000) wurde QFD mit der multikriteriellen Entscheidungstheorie (siehe Kapitel 2.1.1.3) verglichen und eine Reihe von Gemeinsamkeiten festgestellt. Im Rahmen einer industriellen Studie wurde die Aufgabe verfolgt, ein geeignetes Transport-/Passagierflugzeug zu identifizieren, welches die Aufgaben eines bestehenden Systems übernehmen sollte. Während in dieser Studie QFD angewandt wurde, nutzten die Autoren zur Bearbeitung einer identischen Problemstellung die Entscheidungstheorie. Zur Bewertung der Alternativen wird bei QFD eine einfache Skala und in der Entscheidungstheorie Wertefunktionen verwendet. Diese Funktionen repräsentieren dabei explizit die Präferenzen des ET und führen zu einem objektiveren und auch nachvollziehbareren Ergebnis. Während QFD ein Vorgehen zur Strukturierung von Informationen bereitstellt, nutzt die Entscheidungstheorie Verfahren zur Ableitung eines repräsentativen Ergebnisses, bezogen auf die Wertevorstellungen des ET. Dadurch wird deutlich, dass das HoQ als Datenbasis im Rahmen der multikriteriellen Entscheidungstheorie geeignet scheint und daher in dieser Arbeit Anwendung finden soll. Dazu sind allerdings aufgrund der teilweisen Nichterfüllung der Anforderungen entsprechende Modifikationen des bestehenden Ansatzes notwendig, welche im folgenden Kapitel thematisiert werden.

	A1.3	A1.5	A2.1
Checklisten	-	-	-
Entscheidungsmatrizen	-	+	o
Pivot-Tabellen	-	+	+
HoQ	o	+	+

Tabelle 10: Konzeptpunkte vs. Ansätze zur Strukturierung der Datenbasis. *Vergleich der verschiedenen Ansätze aus dem Systems Engineering. Semantik (+: erfüllt, -: nicht erfüllt, o: teilweise erfüllt).*

4.2.3.7 Adaption des HoQ

Wie in dem vorherigen Kapitel verdeutlicht, bietet die Methode des *House of Quality* vielversprechende Fähigkeiten zur Anwendung im Bereich der strukturierten Systembewertung. Dabei eignet sich die Methode zur Formulierung aller entscheidungsrelevanten Parameter aufgrund ihres einfach verständlichen Aufbaus und der Übersichtlichkeit. Dennoch bestehen Einschränkungen, welche im Folgenden genauer erläutert werden sollen.

4.2.3.7.1 Analyse des Anpassungsbedarfs

Das Ziel des HoQ ist die Ermittlung der wichtigsten Kundenerwartungen und deren Berücksichtigung beim Produktdesign. Es bietet die Möglichkeiten, in den Zeilen die übergeordneten Ziele (bspw. Kundenwünsche) und in den Spalten die dafür notwendigen Produktanforderungen aufzuführen. Diese Ziele können von Fähigkeiten oder Kriterien ersetzt werden, so dass die Zeilen („A“, siehe Abbildung 23) von den Eltern- und die Spalten („B“, siehe Abbildung 23) von den entsprechenden Kind-Einträgen besetzt werden. Damit kann die hierarchische Gliederung der deskriptiven Systemmerkmale abgebildet werden. Der Raum („C“, siehe Abbildung 23) des traditionellen Hauses enthält die Korrelationen zwischen den Kundenanforderungen und den Systemparametern. Diese Korrelationen zwischen den Eltern- und ihren Kind-Einträgen werden über Gewichtungen dargestellt, welche die entsprechende Wichtigkeit einer Fähigkeit bzw. eines Kriteriums innerhalb des entsprechenden Elterneintrages beschreiben. Diese Gewichtungen sind für jede relevante Eltern-Kind-Kombination zu definieren und können in den entsprechenden Zellen abgelegt werden.

Im Dach des Hauses („D“, siehe Abbildung 23) werden traditionell die Wechselwirkungen zwischen den Designzielen definiert. Diese beziehen sich auf die Spalteneinträge, d.h. auf die Kind-Einträge. Diese Wechselwirkungen sind für die Systembewertung ebenfalls von enormer Bedeutung, da sich bestimmte Fähigkeiten oder Kriterien gegenseitig positiv oder negativ beeinflussen können. Eine dieser Wechselwirkungen zwischen zwei Kind-Einträgen ist in Abbildung 25 gezeigt. Es werden die *externe Nutzlast* (maximieren) und die aerodynamische *Widerstandsfläche* (minimieren) betrachtet, wobei letztere direkt von der *Nutzlast* abhängt und damit beide Einträge nicht gesondert (unabhängig) voneinander betrachtet werden können. Es ist nicht möglich, dass die externe *Nutzlast* steigt, ohne dass sich die *Widerstandsfläche* ebenfalls erhöht. Diese Korrelation kann in dem Dach mit einem „x“ hinterlegt werden, allerdings ohne eine Vorgabe von einer positiven oder negativen Beeinflussung. Im traditionellen HoQ können diese Wechselwirkungen zur Identifizierung von kritischen Designvariablen genutzt werden, eine rechnerische Berücksichtigung findet allerdings nicht statt (Mavris et al. 2013).

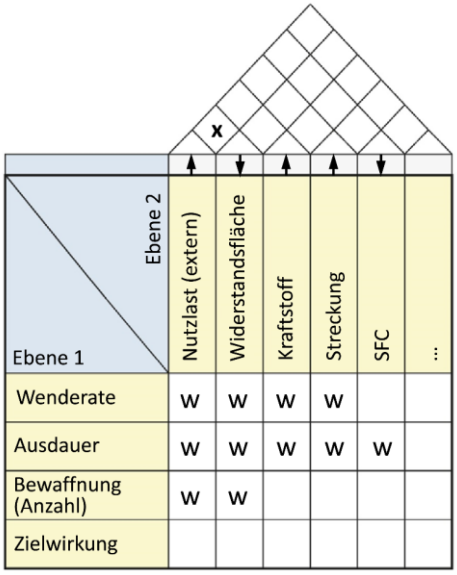


Abbildung 25: Eignung des HoQ. *Qualitativ ausgefülltes HoQ für die Anwendung zur Unterstützung bei einer Systembewertung an einem einfachen Beispiel. Die Gewichtungen sind mit einem „w“ als Platzhalter definiert.*

Weiterhin sind die Zielfunktionen für die Kriterien zu definieren, welche die optimale Ausprägung (Optimierungskriterium) vorgeben. Diese Zielfunktionen können bereits im traditionellen HoQ berücksichtigt werden („BBB“, siehe Abbildung 23). Allerdings ist nur eine Zielfunktion pro Spalte (Kind-Einträge) vorgesehen, was für die Bewertung nicht ausreichend ist. So kann es beispielsweise – wie in Abbildung 25 gezeigt – sein, dass zwei Eltern-Einträge (*Wenderate* und *Ausdauer*) gleiche Kind-Einträge besitzen (bspw. *Streckung*, *Widerstandsfläche* oder *Kraftstoff*). Die entsprechenden Gewichtungen für die Eltern-Kind-Kombinationen sind qualitativ mit einem „*w*“ dargestellt. Oberhalb der Spalten sind die Zielfunktionen definiert, wobei diese unzureichend sind. Der *Kraftstoff* ist für eine Verbesserung der *Wenderate* zu minimieren (weniger Gewicht resultiert in einer höheren *Wenderate*) und gleichzeitig für eine Verbesserung der *Ausdauer* zu maximieren. Eine ähnliche Problemstellung ist bei der *Streckung* zu finden, welche für die *Ausdauer* zu maximieren und für die *Wenderate* zu minimieren ist. Dazu ist für jede Eltern-Kind-Kombination eine entsprechende Zielfunktion zu formulieren, was in dem Aufbau des traditionellen HoQ nicht vorgesehen ist.

Für eine missionsorientierte Bewertung luftgestützter Systeme ist es notwendig, dass einzelne Abhängigkeiten zwischen den Kriterien berücksichtigt werden. So ist es bspw. für die optimale Erfüllung einer Fähigkeit nicht immer notwendig, jede untergeordnete Eigenschaft (optimal) zu erfüllen. Dies soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden. Die *Überlebensfähigkeit* eines Luftfahrzeuges hängt nach (Ball 2003) zu allererst davon ab, ob dieses aufgeklärt werden kann (*Detektierbarkeit*). Weiterhin wird betrachtet, wie anfällig es gegen Treffer ist (*Trefferanfälligkeit*) und schlussendlich werden die Auswirkungen der

Treffer berücksichtigt (*Verwundbarkeit*). Dabei bedingt die *Detektierbarkeit* die *Trefferanfälligkeit* und die *Verwundbarkeit*, d.h. ist ein System nicht detektierbar, so ist die *Überlebensfähigkeit* maximal, unabhängig davon ob ggf. die *Verwundbarkeit* maximal ist. Im Falle der Fähigkeit zur *Umweltwahrnehmung* ist nicht zwingend eine eigene Wahrnehmungsfähigkeit notwendig, denn das System kann auch über eine *Vernetzung* ein verteiltes Lagebild erhalten. So würde eine fehlende aktive *Umweltwahrnehmung* durch eine Vernetzung ausgeglichen und ggf. zu keinem Bewertungsnachteil führen, falls die eigene Perzeption nicht zwingend durch die Nutzenabsicht gefordert ist. Eine weitere Art der Abhängigkeit kann entstehen, wenn zur Berücksichtigung einer Eigenschaft eine andere vorausgesetzt wird. Dies ist bspw. bei der *Wirkung gegen ein Ziel* zu finden, wo eine *Zielwirkung* nur berücksichtigt werden kann, wenn auch Effektoren (*Anzahl der Bewaffnung*) verfügbar sind. Diese verschiedenen Formen der Abhängigkeiten finden in dem HoQ keine Berücksichtigung und würden damit zu einer erheblichen Verfälschung des Bewertungsergebnisses führen.

Weiterführend ist für eine Systembewertung wichtig, ab wann sich ein Vorteil eines Systems gegenüber einem anderen ergibt. Dabei bedeutet nicht jede bessere Ausprägung in einem Kriterium unmittelbar ein Vorteil des Systems. Dies wird am Beispiel der *Wenderate* deutlich, wo nach (Herbst 1980) erst eine Differenz von 3°/s zu einem plattformspezifischen Vorteil im Luftkampf führt. Alle Differenzen unterhalb dieses Wertes führen zu Unvergleichbarkeiten durch eine Indifferenz, d.h. es darf kein plattformspezifischer Vorteil geltend gemacht werden. Diese Präferenzen beziehen sich auf die Eltern-Kind-Kombinationen und sind in dem traditionellen HoQ ebenfalls nicht vorgesehen.

Zusammenfassend weißt das HoQ für die Anwendung im Bereich der Bewertung luftgestützter Systeme folgende Schwächen/Defizite auf:

- Formulierung nur einer *Zielfunktion* für jedes Kriterium
- Keine Definition der *Wertefunktionen* möglich
- Keine Berücksichtigung von notwendigen *Abhängigkeiten* zwischen den Kriterien
- Berücksichtigung der *Wechselwirkungen* zwischen den Kriterien nicht möglich
- Keine Ebenen-übergreifenden *Relationen* (eine Korrelation zwischen zwei Kriterien wirkt sich automatisch auf deren Eltern aus)

Aufgrund der grundsätzlichen Eignung der Methode und der genannten Defizite sind entsprechende Anpassungen notwendig, um diese im *Mikro-Konzept* zur Strukturierung und Verwaltung der Datenbasis anwenden zu können. Diese Modifikationen werden im Folgenden erläutert.

4.2.3.7.2 Modifikationen

Ausgehend von einer hierarchischen Gliederung der missionsorientierten Fähigkeiten und Kriterien sind auf jeder Ebene eine Vielzahl von Parametern zu betrachten. Dazu stellt das HoQ den notwendigen Rahmen bereit, welcher jedoch einige Defizite aufweist. Daher gilt es, die Methode insoweit zu modifizieren, damit sie die bestehenden Anforderungen aus Kapitel 4.2.3.6.1 erfüllt. Dazu werden die ermittelten Defizite aus der vorherigen Betrachtung aufgegriffen und die daraus notwendige Modifikation abgeleitet und umgesetzt.

- Formulierung nur einer Zielfunktion für jedes Kriterium

Wie im obigen Beispiel beschrieben, besteht die Notwendigkeit zur Formulierung der Zielfunktionen für jedes Eltern-Kind-Paar. Im traditionellen HoQ ist dies nur für die Spalteneinträge möglich, so dass die Zielfunktionen fortwährend innerhalb der Zellen des Raumes definiert werden. Damit wird eine individuelle Formulierung und weiterführend auch eine Ableitung von Wechselwirkungen sichergestellt, welche im Dach des Hauses direkt formuliert werden. Ist bspw. der *Kraftstoff* für die *Wenderate* zu minimieren und für die *Ausdauer* zu maximieren, ergibt sich gleichzeitig eine negative Wechselwirkung zwischen den Eltern-Kriterien, welche bei der Bewertung berücksichtigt werden.

- Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Kriterien nicht möglich

Während im traditionellen HoQ zwar Wechselwirkungen formuliert, allerdings nicht weiter berücksichtigt wurden, werden diese bei der Berechnung der Ausprägungen integriert. Diese Wechselwirkungen werden zum einen automatisch aus entgegengesetzten Zielfunktionen ermittelt oder sie können ebenfalls durch entsprechende Fachleute oder den ET editiert werden. Dabei gibt es unterschiedliche Skalierungen, welche die Wechselwirkungen beschreiben. Sie reichen von stark positiv über neutral bis stark negativ.

Die Relationen können wie folgt beschrieben werden:

Stark positiv (++)	Es wurden Wechselwirkungen identifiziert, welche mit den entsprechenden Zielfunktionen der Kriterien übereinstimmen. Sind bspw. beide Kriterien zu maximieren und eine Erhöhung eines Kriteriums führt gleichzeitig zu einer Erhöhung des korrelierten Kriteriums, entsteht eine positive Wechselwirkung. Sind die Zielfunktionen der entsprechenden Kind-Kriterien nicht beschreibbar (optimaler Wert unbekannt, bspw. bei Geschwindigkeiten oder Flughöhen), sind die Ausprägungen der Kriterien simultan mit einer entsprechenden Optimierungsrechnung zu bestimmen.
Positiv (+)	Positive Wechselwirkungen unterscheiden sich von stark positiven dadurch, dass sich eindeutige (nicht gegensätzliche) Zielfunktionen für die Kind-Kriterien formulieren lassen und damit die Ausprägungen über unabhängige BM berechnet werden können. Ein Beispiel sind die *Stationäre* und *Instationäre Wenderate* (gekoppelt über Flughöhe und Gewicht) oder die Detektions- und Erkennungswahrscheinlichkeit (gekoppelt über GSD und Zielgröße).
Neutral	Es wurden keine Wechselwirkungen innerhalb der Zeilen- oder Spalteneinträge identifiziert
Negativ (-)	Sind bspw. zwei Kriterien zu maximieren, allerdings führt eine Erhöhung des Kriteriums zu einer Verringerung des korrelierten Kriteriums, besteht eine negative Wechselwirkung. Sind diese über eindeutige Zielfunktionen der Kind-Kriterien beschreibbar, können die Ausprägungen mittels BM ermittelt werden. Ein Beispiel ist die *Bewaffnung* und die *Flugleistung*. Externe Bewaffnung führt zu einer zusätzlichen Widerstandsfläche, welche die Flugleistungen verschlechtert.
Stark negativ (- -)	Sind die Zielfunktionen der Kind-Kriterien nicht beschreibbar, so sind die Ausprägungen identisch einer stark positiven Korrelation über Optimierungsrechnungen unter Berücksichtigung der Gewichtungen zu bestimmen. Ein Beispiel ist die *Aufklärungsleistung* und die *Überlebensfähigkeit*, welche vorwiegend über die Flughöhe (und auch die Geschwindigkeit) verbunden sind. Eine höhere Flughöhe bzw. Distanz zur Bedrohung bedeutet eine

höhere *Überlebensfähigkeit* (Bedrohung vom Boden) und gleichzeitig eine geringere *Aufklärungsleistung* (Bodenaufklärung). Die optimale Flughöhe ist abhängig von der Gewichtung beider Fähigkeiten.

Mit diesen Wechselwirkungen wird sichergestellt, dass die Ausprägungen der Kriterien nicht unabhängig voneinander ermittelt werden und dabei falsche Werte annehmen. Diese Zusammenhänge sind ebenfalls im Falle von subjektiven Ausprägungsermittlungen zu berücksichtigen, indem der ET auf unrealistische Ausprägungen durch definierte Wechselwirkungen hingewiesen wird.

- Keine Definition der Wertefunktionen möglich

Die modifizierte Methode dient dazu, alle entscheidungsrelevanten Parameter für die Entscheidungstheorie zu strukturieren. Zu diesen Parametern zählen auch die Wertfunktionen, welche bspw. starke und schwache Präferenzen sowie Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten beschreiben. Dies ist für eine genaue Bewertung der luftgestützten Systeme essentiell, da teilweise nicht gleich eine bessere Ausprägung in einem Kriterium einen Vorteil und damit eine bessere Bewertung bedeutet. Weiterhin kann es der Fall sein, dass ein Vorteil nicht linear von einer Ausprägungsdifferenz abhängt. Somit ergibt sich nicht immer ein linearer Zusammenhang und die individuellen Präferenzen sind ähnlich der Zielfunktion für jedes Eltern-Kind-Paar einzeln zu formulieren. Die Wertfunktionen sind dabei abhängig von der gewählten Methode der Entscheidungstheorie und werden in Kapitel 4.3.2.3 genauer behandelt. Diese werden in den Zellen des Raumes mit einem farbigen Punkt hinterlegt (siehe Abbildung 26). Ein grüner Punkt bedeutet dabei, dass alle Funktionen für die gewählten MCDA- Methoden definiert wurden, ein roter Punkt indiziert dagegen eine vakante Wertfunktion.

- Keine Berücksichtigung von notwendigen Abhängigkeiten zwischen den Kriterien

Wie im obigen Beispiel mit den verfügbaren Effektoren oder der *Überlebensfähigkeit* gezeigt, gibt es Kriterien, deren Berücksichtigung für die Bewertung an bestimmte Abhängigkeiten gekoppelt ist. Bei dem Ziel einer möglichst hohen *Überlebensfähigkeit* ist eine möglichst niedrige *Detektierbarkeit*, *Trefferanfälligkeit* und *Verwundbarkeit* gefordert. Dabei ist die Berücksichtigung der *Verwundbarkeit* abhängig von der *Trefferanfälligkeit* und diese wiederum von der *Detektierbarkeit*. Eine weitere Abhängigkeit beschreibt das Ersetzen von Fähigkeiten durch andere, ohne dass ein Nachteil entsteht. Ein Beispiel dafür ist die Vernetzung und damit der Austausch von Aufklärungsergebnissen ohne eigene aktive Aufklärung. Die unterschiedlichen Abhängigkeiten sind:

Voraussetzend (requ)	Zur Berücksichtigung einer Eigenschaft (Fähigkeit, Kriterium) wird eine andere Eigenschaft vorausgesetzt. Ist die vorausgesetzte Eigenschaft nicht vorhanden, wird die Eigenschaft ebenfalls als nicht erfüllt betrachtet. Beispiel: *Zielwirkung* und *verfügbare Effektoren*
Ersetzend (repl)	Eine Eigenschaft kann durch eine andere Eigenschaft ersetzt werden. Ist dies der Fall, gilt die Eigenschaft ebenfalls als entsprechend erfüllt und wird für die Bewertung berücksichtigt. Beispiel: *Detektierbarkeit* und *Verwundbarkeit*

Dazu wurde das traditionelle Haus um einen „*Keller*“ und einen „*Vorgarten*“ erweitert, in denen fortwährend diese Abhängigkeiten beschrieben werden können. Der „*Keller*“ bezieht sich dabei auf die Spalten

(Kind-Einträge) und der „*Vorgarten*“ auf die Zeilen (Eltern-Einträge). Diese Abhängigkeiten werden bei der Berechnung des Systempotentials (SPP) zur Erfüllung der Nutzenabsicht berücksichtigt, wodurch ein detailliertes Ergebnis abgeleitet werden kann.

- Keine Ebenen-übergreifenden Relationen

Durch den hierarchischen Aufbau wird für jede Ebene ein entsprechendes Haus aufgebaut und editiert. Dabei können ebenen-übergreifend Informationen übergeben werden, so dass bspw. die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen an entsprechende Vorfahren (Eltern) oder Nachkommen (Kinder) der Kriterien auf darüber- bzw. darunterliegenden Ebenen in der hierarchischen Struktur vererbt werden. Damit können bei einer Ermittlung von fähigkeitsbedingten Relationen diese bis auf die untersten Ebenen vererbt werden, so dass die Quantifizierung unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen erfolgen kann. Weiterhin besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass bei identifizierten Relationen auf unterster Ebene diese an die übergeordneten Ebenen übertragen werden.

In diesem Kapitel wurde das HoQ als vielversprechendste Methode hinsichtlich deren Eignung und Tauglichkeit für die Anwendung zur Strukturierung der expliziten Datenbasis untersucht und ausgehend davon entsprechende Anpassungen vorgenommen. Diese Modifikationen sind in Abbildung 26 zusammengefasst. Um die Methode als solche von dem ursprünglichen HoQ abzutrennen und die beiden unterschiedlichen Anwendungsbereiche zu verdeutlichen, soll diese modifizierte Methode im folgenden *House of Metrics* (*HoM*) genannt werden.

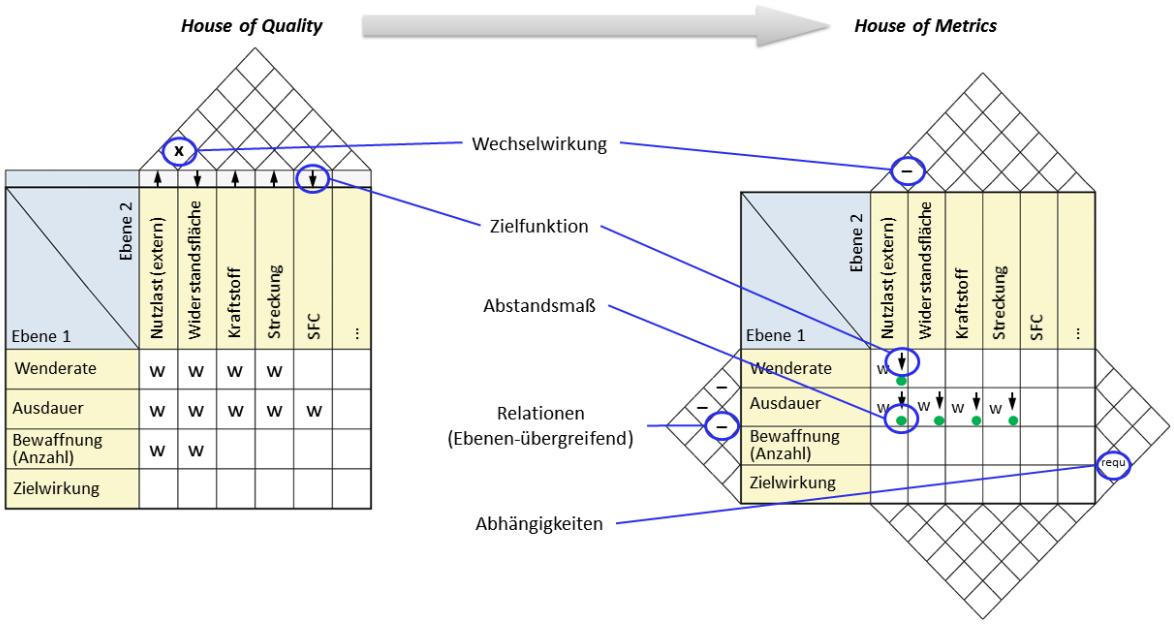


Abbildung 26: Notwendige Modifikationen für das *House of Metrics*. *Es werden qualitativ alle Modifikationen am traditionellen House of Quality (links) aufgezeigt, welche zur Anpassung der Methode und damit zur Nutzung für die Systembewertung notwendig sind. Aufgrund der Anpassungen wurde die modifizierte Methode House of Metrics (rechts) genannt.*

In Abbildung 27 ist das *HoM* innerhalb des *Mikro-Konzeptes* dargestellt (blaue Umrandung). Die farbliche Markierung ist identisch zu den drei Prozessen in Abbildung 13 (siehe Kapitel 4.1). Die Nutzenabsicht wird in dem *Stakeholder Expectations Process* definiert. Daraus wird unter Nutzung der

vorgestellten Blockstruktur mit den Fähigkeitsbausteinen und den Kriterien eine deskriptive Struktur abgeleitet (siehe Kapitel 4.2.1). Neben dieser hierarchischen Struktur werden ebenfalls alle entscheidungsrelevanten Parameter (Gewichtung, Zielfunktionen, Präferenzen, Wechselwirkungen, Abhängigkeiten) in dem *HoM* über alle Hierarchiestufen definiert (siehe Kapitel 4.2.2). Dabei wird ausgehend von den Wechselwirkungen (Korrelationen) zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien die Nutzung von BM abgeleitet (siehe Kapitel 4.2.3.7.2) und anschließend die entsprechenden Ausprägungen ermittelt. Diese BM sind dabei nicht Bestandteil des *HoM*. Die Ausprägungen werden zusammen mit der Datenbasis aus dem *HoM* im *Task Criteria Evaluation Process* verrechnet, um ein Bewertungsergebnis zu ermitteln (siehe Kapitel 4.3).

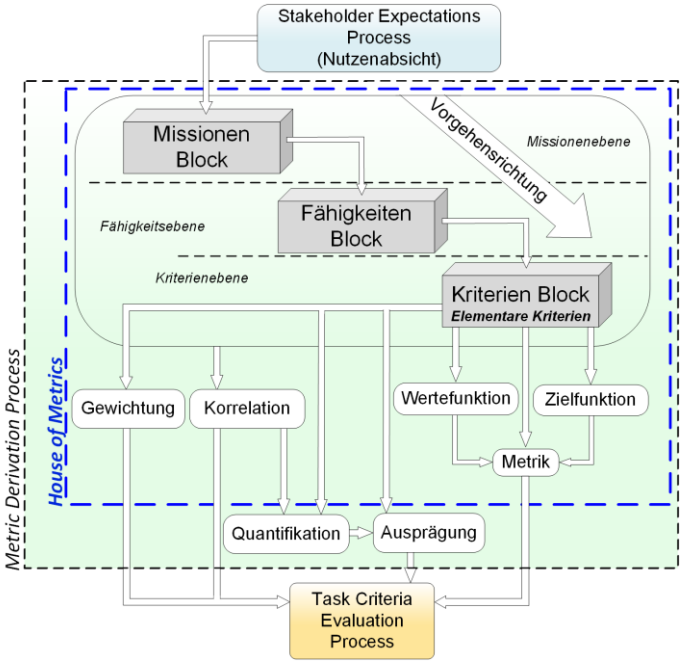


Abbildung 27: Einordnung des *House of Metrics* innerhalb des *Metric Derivation Process*. *Die Metrik ergibt sich aus den Elementaren Kriterien und der zugehörigen Zielfunktion sowie den entsprechenden Wertefunktionen. Im House of Metrics werden die entscheidungsrelevanten Parameter bestimmt (außer die Ausprägungen). Die BM sind nicht Teil des HoM und werden innerhalb des Metric Derivation Process zur Ermittlung der Ausprägungen genutzt.*

4.3 Task Criteria Evaluation Process

Während im vorherigen Kapitel die methodische Strukturierung und Ableitung der Datenbasis erläutert wurde, wird nun die Ableitung des Bewertungsergebnisses aus der Datenbasis im TCEP behandelt. Dazu werden im ersten Teil dieses Kapitels die Methoden der Multikriteriellen Entscheidungstheorie gesichtet und bewertet (Kapitel 4.3.1 und 4.3.2), während im zweiten Teil Methoden zur Bewertung des resultierenden Ergebnisses (Kapitel 4.3.3 und 4.3.4) thematisiert werden.

Zur Unterstützung und Objektivierung des menschlichen Urteilsvermögens innerhalb des Entscheidungsprozesses ist der Einsatz von Bewertungsverfahren unabdingbar (Bertsch 2007). Diese sind methodische Werkzeuge zur Unterstützung der Entscheidungsfindung und bei gewissenhafter Anwendung wichtige Entscheidungshilfen speziell bei komplexen Entscheidungsproblemen. Im Folgenden wird eine Auswahl von Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie betrachtet und hinsichtlich deren Tauglichkeit für den Einsatz im *Task Criteria Evaluation Process* bewertet. Dabei wird zunächst die Pareto-Optimalität behandelt, welche die Grundlage für die moderne Entscheidungstheorie (Kapitel 4.3.2) bildet, allerdings zur Anwendung der Ergebnisableitung und damit als Bewertungsmethode in dieser Arbeit nicht unmittelbar geeignet ist. Jedoch soll diese Methodik für die Berechnung konfliktärer

Kriterien (siehe Kapitel 4.2.3.7) genutzt werden. Für die Auswahl einer entsprechenden Bewertungsmethode wird anschließend (ab Kapitel 4.3.2) auf den methodischen Fundus der kompensatorischen MCDA- Methoden (siehe Kapitel 2.1.1.3) zurückgegriffen.

4.3.1 Pareto Optimalität

Das Fundament der modernen MCDA- Theorie ist das Dominanzkonzept nach Vilfredo Pareto (Sun 2012). Eine Lösung ist dann Pareto-optimal, wenn kein Kriterium verbessert werden kann, ohne gleichzeitig mindestens ein anderes Kriterium zu verschlechtern (Branke 2008). Die Definition der Pareto-Optimalität zeigt an, dass es keine andere Alternative gibt, welche eine gleiche oder bessere Ausprägung in allen betrachteten Kriterien hat. Der Ort der in diesem Sinne optimalen Lösungen wird als *Pareto Front* bezeichnet. Die MCDA- Methoden ermitteln aus der *Pareto-Front* die „beste" Lösung unter Berücksichtigung der Wertvorstellungen des ET (Rousis 2011). Eine exemplarische Lösungsmenge und die zugehörige *Pareto-Front* ist in Abbildung 28 dargestellt. Auf den Achsen sind qualitativ die Ausprägungen zweier Kriterien aufgetragen. Die Summe der Kombinationen beider Kriterienausprägungen bildet zusammen die mögliche *Pareto-Menge* (Pareto-Set) und ist als eingefärbte Fläche dargestellt. Bei einer Minimierung beider Ausprägungen (bspw. *Kraftstoffverbrauch* und *Falschdetektionen* einer Aufklärungsplattform) sind alle Punkte optimal, welche sich am linken unteren Rand der *Pareto-Menge* befinden. Die sich daraus ergebende *Pareto Front* wird durch die schwarze Linie repräsentiert. Darauf sind alle Kombinationen optimal, falls keine Gewichtungen berücksichtigt werden (Branke 2008). Dies bedeutet, dass eine Verbesserung von einem Kriterium nur dann möglich ist, wenn sich dadurch ein anderes Kriterium verschlechtert. Wird bspw. Alternative 2 betrachtet, so fällt auf, dass diese nicht auf der *Pareto Front* liegt und somit in keinem Fall optimal ist. Durch eine weitere Verringerung der Ausprägung eines Kriteriums (1 oder 2) könnte diese Alternative im Hinblick auf die Erfüllung des Zielsystems verbessert werden. Alternative 1 ist hingegen bereits optimal, da sie auf der *Pareto Front* liegt. Aufgrund des Pareto-optimalen Zustandes ist nun eine Verbesserung (weitere Minimierung) von Kriterium 2 hin zur Alternative 3 nur möglich, wenn sich Kriterium 1 verschlechtert (maximiert) (Mattson und Messac 2003).

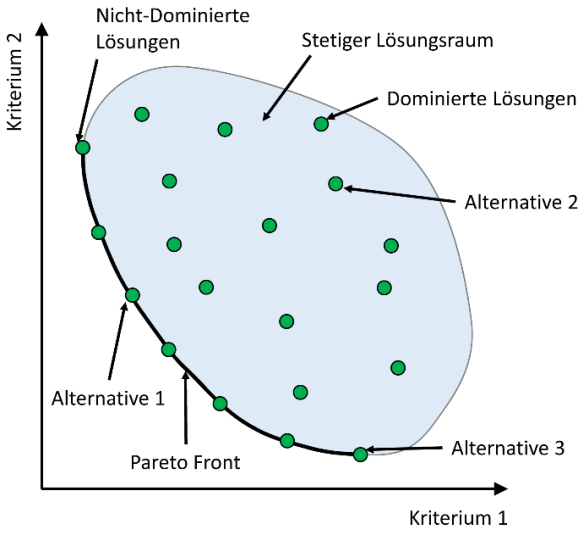


Abbildung 28: Lösungsmenge (Pareto-Set) und sich daraus ergebende *Pareto Front*. *Der mögliche Lösungsraum wird durch den farblich hervorgehobenen Bereich dargestellt. Die beiden Kriterien sollen minimiert werden, so dass sich eine Pareto Front mit Ausrichtung zum Koordinatenursprung ergibt. Alle Lösungen auf dieser Front sind optimal. Eine dominierte Lösung bedeutet, dass diese nicht Teil der Pareto-Front ist und damit Lösungen existieren, welche in mindestens einem Kriterium „besser" sind.*

Das Finden der „besten" Alternative mit dem Pareto Ansatz besteht aus zwei Schritten, welche seriell durchzuführen sind. Die erste Phase besteht aus der Ermittlung der sogenannten Pareto-Lösungen (Pareto-optimale Alternativen). Diese erste Phase ist objektiver Natur und durch keine Nutzerpräferenzen

beeinflusst. Anschließend erfolgt die Auswahl einer Alternative auf Basis der Nutzerpräferenz, wodurch diese zweite Phase einen subjektiven Einfluss erhält. Für die erste Phase sind in der Literatur mehrere Methoden zu finden, bspw. die *Physical Programming* Methode (PP), die *Normal Boundary Intersection* Methode (NBI), die *Normal Constraint* Methode (NC) und die *Compromise Programming* Methode (CP). Die NBI-Methode ist allgemein anfälliger für das Generieren von dominierten Lösungen als die NC-Methode, d.h. die NBI-Methode generiert auch nicht Pareto-optimale Lösungen. Die CP-Methode ist eine Weiterentwicklung der WS-Methode und in der Lage, Lösungen auf konvexen und konkaven *Pareto-Fronten* zu finden. Allerdings werden auch mit dieser Methode nicht immer Pareto-optimale Lösungen generiert. Aus diesem Grund wurde eine Weiterentwicklung der NC-Methode zur *Normalized Normal Constraint Method* durch (Messac et al. 2003) vorgenommen, welche einen Pareto Filter einsetzt, um dominierte Alternativen zu eliminieren. Genauere Erläuterungen zum ersten Schritt werden bei der Umsetzung des Konzeptes in Kapitel 5.3.2 ausgeführt.

In der zweiten Phase wird ausgehend von der Pareto-optimalen Lösungsmenge derjenige Punkt (Alternative) ausgewählt, welcher mit den Wertvorstellungen des ET übereinstimmt. Der allgemeine Ansatz ist die Formulierung einer Zielfunktion (*Objective Function*), welche alle Ziele zu einer aggregierten Zielfunktion (*Aggregate Objective Function*) zusammenfasst.

4.3.1.1 Zielfunktionen auf der *Pareto Front*

Zur Definition der Zielfunktion gibt es unterschiedliche Ansätze wie bspw. das *Goal Programming*, *Physical Programming* oder *Genetic Algorithm*, welche sich in deren Anwendungsbereichen unterscheiden (Messac et al. 2003). Die einfachste und weitverbreitetste Methode zur Bildung der Zielfunktion ist die *Weighted Sum* Methode (WSM), welche eine gewichtete lineare Kombination aller Zielfunktionen ist (Rousis 2011). Für eine zweidimensionale Problemstellung wie in Abbildung 28 ergibt sich die Aggregierte Zielfunktion J zu:

$$J = w_1\mu_1(x) + w_2\mu_2(x), \tag{1}$$

wobei μ_1 und μ_2 die Ausprägungen der beiden Kriterien und w deren Gewichtungen repräsentieren. Die Ausprägungen sind dabei direkt voneinander abhängig, was generisch mit einem x berücksichtigt wird. In Abbildung 29a sind die linearen Isolinien dieser Zielfunktion und eine qualitative Lösungsmenge dargestellt. Der Anstieg der Linien wird dabei durch die kriterienspezifischen Gewichtungen w vorgegeben. Die Optimierung wird beendet, wenn keine weitere Minimierung der Aggregierten Zielfunktion möglich ist, ohne den Lösungsraum zu verlassen. Im Falle von $w_1 = 0$ würden die Linien parallel zu μ_1 verlaufen und Alternative 2 wäre das Optimum. Im Falle von $w_2 = 0$ ergibt sich Alternative 1 als die optimale Lösung. Für alle anderen Kombinationen ergeben sich unterschiedliche Punkte auf der *Pareto Front* als optimale Kombination. Der Nachteil dieser Zielfunktion nach der *Weighted Sum* Methode entsteht dadurch, dass diese nur für konvexe *Pareto Fronten* anwendbar ist (Kim und Weck 2006). Durch den linearen Verlauf der Isolinien kann bspw. in Abbildung 29a Alternative 3 sowie alle weiteren Punkte auf der *Pareto Front* zwischen Alternative 5 und Alternative 4 nicht erreicht werden. Eine Lösung dafür bietet das *Compromise Programming* (Ringuest 1992), welches eine einfache Erweiterung der *Weighted Sum* Strategie vorsieht. Dazu wird ein Exponent n in die Zielfunktion eingefügt, so dass die Isolinien für einen Exponenten größer eins keine geraden Linien mehr ergeben. Die neue Zielfunktion hat die Form:

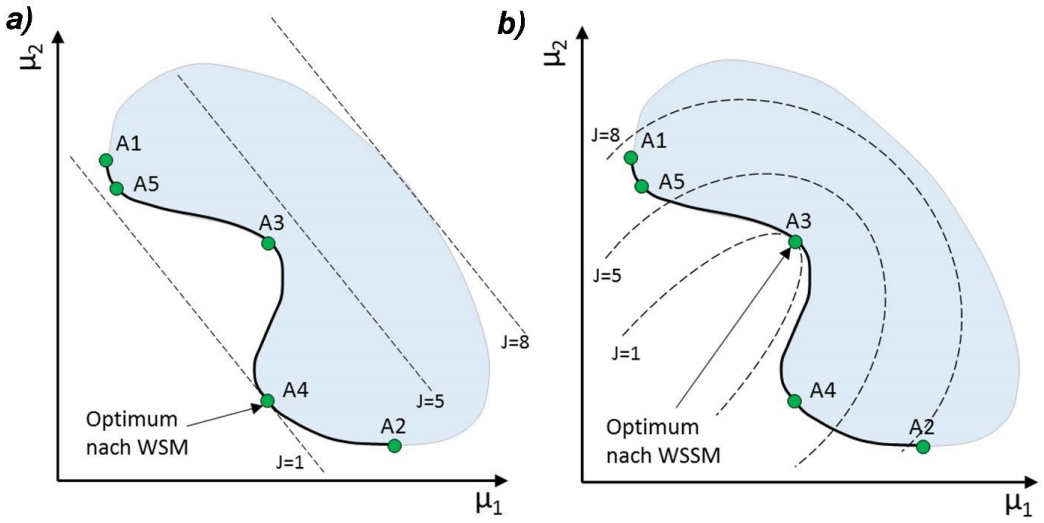


Abbildung 29: a: Ergebnis der Zielfunktion nach der *Weighted Sum* Methode; b: Ergebnis der Zielfunktion mit der *Weighted Square Sum* Methode Methode (mod. nach (Messac 2015)). *Die WS-Methode führt aufgrund der linearen Kombination der einzelnen Ziele zu linearen Isolinien, welche nur eingeschränkt Punkte auf der Pareto Front erreichen. Mit Hilfe der WSSM oder CP wird die Zielfunktion mit einem Exponenten angepasst, so dass auch konkave Pareto Fronten betrachtet werden können.*

$$J = w_1 \mu_1^{\,n}(x) + w_2 \mu_2^{\,n}(x) \cdot \tag{2}$$

Dabei sollte nach (Messac 2015) der Exponent n ein ganzzahliger Wert zwischen 2 und 8 sein. Dieser Ansatz ist auch als *Weighted Square Sum* Methode (WSSM) bekannt. In Abbildung 29b wird deutlich, dass auf Basis der Gewichtung jeder Punkt auf der *Pareto Front* erreichbar ist. Bei einer entsprechenden Gewichtung beider Kriterien würde sich als Optimum Alternative 3 ergeben, während diese bei dem vereinfachten Vorgehen nicht erreicht werden konnte.

Es soll noch einmal hervorgehoben werden, dass sich bis jetzt die *Pareto-Menge* aus unterschiedlichen Alternativen zusammensetzt, aus denen schlussendlich die optimale (beste) herausgefiltert wird. Bis zu diesem Punkt beschreibt die *Pareto-Menge* den Lösungsraum für die multikriterielle Entscheidungstheorie. Zusätzlich dazu können optimale Systemparameter bestimmt werden. Dadurch unterscheidet sich diese Methode von den klassischen MCDA- Methoden zum ausschließlichen Bilden einer Rangfolge der Alternativen. So ist bspw. die Fragestellung nach der optimalen *Fluggeschwindigkeit* bei einer Aufklärungsmission relevant, wenn gleichzeitig die *Aufklärungsrate* und der *Energieverbrauch* betrachtet werden. Diese Fragestellung wurde bereits mathematisch von (Bradley und Atkins 2014) untersucht und festgestellt, dass die optimale Geschwindigkeit von der jeweiligen Gewichtung zwischen den beiden genannten Kriterien abhängt. Aus der *Pareto Front* können damit auch die optimalen Systemparameter bestimmt werden, um ausgehend von der Gewichtung diejenigen Ausprägungen (μ) zu ermitteln, welche zu einem optimalen Kompromiss führen.

4.3.1.2 Einschub: Relevanz des Pareto Prinzips für die Bestimmung konfliktärer Kriterienausprägungen

Bis zu diesem Punkt wurde das Pareto Prinzip als „*foundation of modern MCDA theory*“ (Sun 2012) behandelt, da es eine „*very useful definition of optimality in MCDA*“ (Chen 2006) bietet. Während diese –

aus dem Pareto Prinzip entwickelten – modernen MCDA- Methoden im folgenden Kapitel 4.3.2 thematisiert werden, wird in dieser Arbeit das Pareto Prinzip für die Berechnung optimaler Ausprägungen innerhalb des MDP genutzt, was nun im Folgenden behandelt werden soll.

Wie bei der Ableitung des *HoM* verdeutlicht, ist es essentiell, die Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten und Kriterien zu berücksichtigen. Diese können unterschiedliche Ausprägungen annehmen, von stark positiv bis stark negativ (siehe Kapitel 4.2.3.7.2). Diese Wechselwirkungen entstehen aufgrund der Korrelation mindestens zweier Fähigkeiten oder Kriterien zueinander, was eine separate Betrachtung ausschließt. Dies soll an einem zweidimensionalen Beispiel verdeutlicht werden. In einem Szenario hat ein UAV die Aufgabe, eine Straße aufzuklären. Ein qualitativer Ausschnitt aus einer Ebene der HoM-Struktur ist in Abbildung 30 dargestellt. Es zeigt die *Leistung (Throughput)* und zwei Kindkriterien. Die *Aufklärungsrate* [m²/s] und die *Entropie*[73]. Die Überwachungsaufgabe beinhaltet z.B. das Erkennen eines Objektes oder Feststellen einer Veränderung in einem geografischen Bereich. Durch mehrfache Aufnahme eines Bildbereiches entstehen erwünschte Redundanzen für Operateure oder Algorithmen, wobei die *Entropie* des Bildmaterials minimiert wird (Bradley und Atkins 2014). Gleichzeitig ist die *Aufklärungsrate* zu maximieren. Beide sind zum gleichen Zeitschritt voneinander abhängig und beziehen sich auf identische Kindkriterien wie bspw. *Fluggeschwindigkeit*, *Flughöhe, Framerate* und *Sichtfeld* des Sensors. Bei diesem einfachen Beispiel soll davon ausgegangen werden, dass die *Ground Sample Distance* automatisch durch Begrenzung des Sichtfeldes in Abhängigkeit der Flughöhe angepasst wird, so dass die Erkennungswahrscheinlichkeit ausreichend hoch ist (über 80%)[74]. Dennoch sind die optimalen Werte für die *Fluggeschwindigkeit*, die *Flughöhe* und das *Sichtfeld* des Sensors bei einer konstanten *Framerate* unbekannt, da sich keine eindeutigen Zielfunktionen definieren lassen. Für die maximale Fläche wäre die *Fluggeschwindigkeit* bspw. zu maximieren, während für eine minimale *Entropie* eine minimale *Fluggeschwindigkeit* optimal wäre.

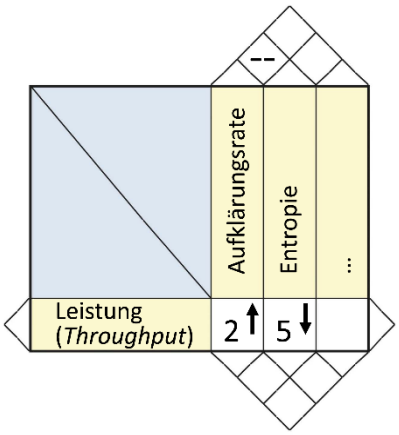


Abbildung 30: Wechselwirkung zwischen *Aufklärungsrate* und *Entropie* im *HoM*. *Zwischen der Aufklärungsrate und der Entropie besteht eine stark negative Wechselwirkung, welche von der Fluggeschwindigkeit, der Framerate und der Größe des Sensorsichtfeldes am Boden (Footprint) abhängt.*

Damit sind unter Berücksichtigung der Präferenzen des ET die optimalen Parameter zu bestimmen, für welche der beste Kompromiss aus *Aufklärungsrate* (Fläche pro Zeit) und *Entropie* entsteht. Dazu bietet das Prinzip der *Pareto Fronten* ein geeignetes Vorgehen, welches durch Variation der entsprechenden Parameter (*Höhe*, *Geschwindigkeit* und *Sichtfeld*) eine *Pareto Menge* und anschließend die entsprechende Front ermittelt. Diese ist in Abbildung 31 dargestellt, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die

[73] Überlappung des Sensorerfassungsbereiches am Boden (*Footprint*) von zwei aufeinanderfolgenden Einzelbildern (*Frames*). Eine minimale *Entropie* beschreibt dabei eine komplette Überlappung der Bilder (exakte Aufnahme des gleichen Bildes in zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten).

[74] Diese Abhängigkeit ist nicht in Abbildung 30 dargestellt, allerdings bei der Berechnung berücksichtigt.

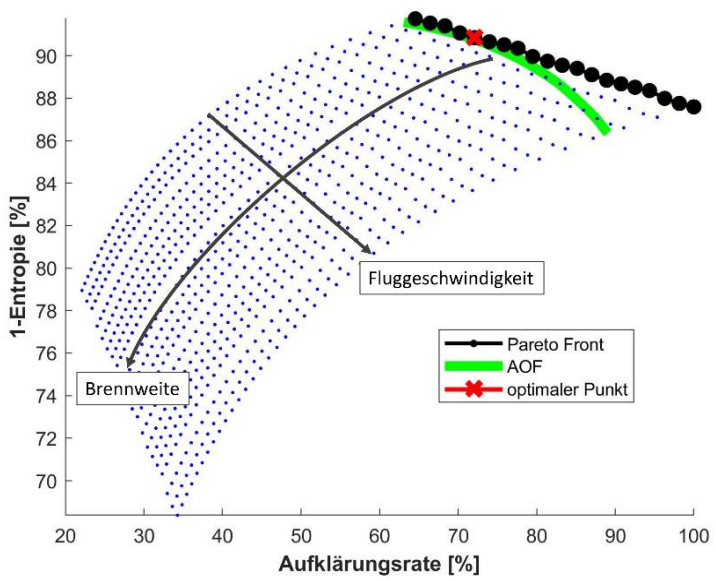


Abbildung 31: *Pareto Front* für die *Aufklärungsrate* und die *Entropie* bei variabler Geschwindigkeit, Höhe und variablem Sichtfeld. *Nach Variation der Parameter ergibt sich der optimale Kompromiss bei einer Gewichtung von 0,3 für die Aufklärungsrate und 0,7 für die Entropie bei einer Fluggeschwindigkeit von 50,3 m/s, einer Brennweite von 110mm und einer Flughöhe von 90m. Die Framerate wurde mit 30 konstant gehalten. Die schwarze Linie zeigt die Pareto Front und der hervorgehobene Punkt die Lösung mit den optimalen Systemparametern. Es werden nur Konfigurationen angezeigt, welche eine Entdeckungswahrscheinlichkeit größer 80% haben.*

Geschwindigkeit, *Flughöhe* und *Brennweite* variiert wurden. Die *Aufklärungsrate* wurde auf einen Maximalwert normiert, so dass die Einheit ebenfalls prozentual angegeben werden kann. Die *Entropie* wurde hinsichtlich ihrer Zielfunktion invertiert (1-*Entropie*), so dass beide Achsen zu maximieren sind und sich die *Pareto Front* an der rechten oberen Ecke ausrichtet. Die Systemparameter wurden in bestimmten Grenzen variiert und für das beste Ergebnis optimiert. Dazu wurde eine Präferenz des ET hinsichtlich der normierten Gewichtung von 0,3 für die *Aufklärungsrate* und 0,7 für die *Entropie* angenommen. Die einzelnen Punkte stellen jeweils eine Kombination aus den variablen Systemparametern dar. Auf der schwarzen Linie werden diejenigen Kombinationen aus den Systemparametern dargestellt, welche ohne Betrachtung der Präferenzen optimal sind (*Pareto Front*). Um den besten Kompromiss hinsichtlich der Gewichtungsverteilung zu ermitteln, wurde mittels der *WSSM* der Schnittpunkt zwischen der *Pareto Front* und der *Aggregierten Zielfunktion* (Grüne Parabel) bestimmt. Dabei stellt die Parabel diejenige Isolinie der *Aggregierten Zielfunktion* (AOF, *Aggregate Objective Function*) dar, welche die Front tangiert. Dieser Schnittpunkt beschreibt die optimalen Systemparameter und die zugehörigen Ausprägungen der *Aufklärungsrate* und der *Entropie*. In diesem Beispiel ergibt sich bei einer *Fluggeschwindigkeit* von 50,3m/s, einer *Flughöhe* von 90m und einer *Brennweite* von 110mm eine *Aufklärungsrate* von 72,1% und eine *Entropie* von 9,2% (1-Entropie = 90,8%). Diese Kombination der Parameter ist mit dem hervorgehobenen Punkt auf der *Pareto Front* verdeutlicht.

An dieser Stelle soll noch einmal verdeutlicht werden, dass sich die Anwendung des Pareto-Prinzips in dieser Arbeit auf die Ermittlung der Kriterienausprägungen bei widersprüchlichen Zielfunktionen bezieht, um den besten Kompromiss der Ausprägungen unter Berücksichtigung der Gewichtung des ET zu ermitteln. Diese Ausprägungen werden weiterführend genutzt, um in Kombination mit der Datenbasis aus dem *HoM* ein Bewertungsergebnis mit Methoden der Mehrfachzielentscheidung (MCDA) abzuleiten. Für diese MCDA- Methoden werden keine *Pareto Fronten*, sondern daraus weiterentwickelte *kompensatorische* Vorgehen betrachtet (siehe Kapitel 2.1.1.3 und Kapitel 3.2).

4.3.2 Kompensatorische MCDA- Verfahren

Das bereits vorgestellte Konzept der Pareto-Optimalität kann nur zum Auffinden der optimalen Lösung dienen, während eine Rangfolge zwischen den betrachteten Alternativen nicht abgeleitet werden kann. Zur Realisierung dieser Forderung wurde der theoretische Fundus erweitert, um die *„incomparabilties by explicitly incorporating preferential information of the decision maker(s)"* (Brans und Mareschal 2005) zu reduzieren. Daher wurden MCDA- Verfahren entwickelt, um ebensolche Rangfolgen abzuleiten (Figueira et al. 2005) und um die Nachteile klassischer Optimierungsmodelle zu überwinden (Oberschmidt 2010). Letztere sind in der Regel allein auf die Minimierung einer monokriteriellen Zielgröße wie zum Beispiel *Kosten* ausgerichtet. Jedoch stellen Entscheidungen auf Basis einer Zielgröße in der Praxis eher eine Ausnahme dar, da meist eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren das Ergebnis beeinflussen, welche nicht auf nur eine Zielgröße abgebildet werden können (siehe Kapitel 2.1.2.3). Ausgewählte Verfahren sollen im Folgenden vorgestellt und bzgl. ihrer Eignung untersucht werden.

4.3.2.1 Nutzwertanalytische Verfahren

Die nutzwertanalytischen Bewertungsverfahren werden vor allem in der Betriebswirtschaftslehre und den Ingenieurswissenschaften angewandt (Brauchlin und Heene 1995) und basieren auf der multiattributiven Nutzentheorie (*Multi Attribute Utility Theory*, MAUT), welche auch als multiattributive Werttheorie (*Multi Attributive Value Theory*, MAVT) für Entscheidungssituationen bei sicher bekannten Umweltzuständen adaptiert wurde (Dyer und Sarin 1979). Eine vereinfachte Variante der MAVT ist bspw. die *Nutzwertanalyse* (NWA), welche auf dem Model der additiven Wertaggregation beruht. Für die Bewertung wird ein Gesamtnutzenwert betrachtet, welcher sich aus der Aufsummierung der gewichteten Summen von partiellen Nutzenwerten berechnet (Eisenführ et al. 2010). Diese Addition zu einem Gesamtnutzenwert setzt voraus, dass die für diese Rechenoperationen zugrundeliegenden Kriterienausprägungen auf Skalen mit einem hohen Niveau (Ratioskala, siehe Anhang) durchgeführt werden.

Der Ablauf der NWA ist in Abbildung 32 dargestellt. Zu Beginn wird das aufgabenspezifische Zielsystem festgelegt, welches sich aus der Art der Entscheidungssituation ergibt. Dabei können Ziele auch in Teilziele zerlegt werden, so dass eine Kriterienstruktur entsteht. Anschließend werden die Zielerträge für jede Alternative und jedes Kriterium ermittelt und mittels eines Zielerfüllungsgrades in einen Zielertrag *e*

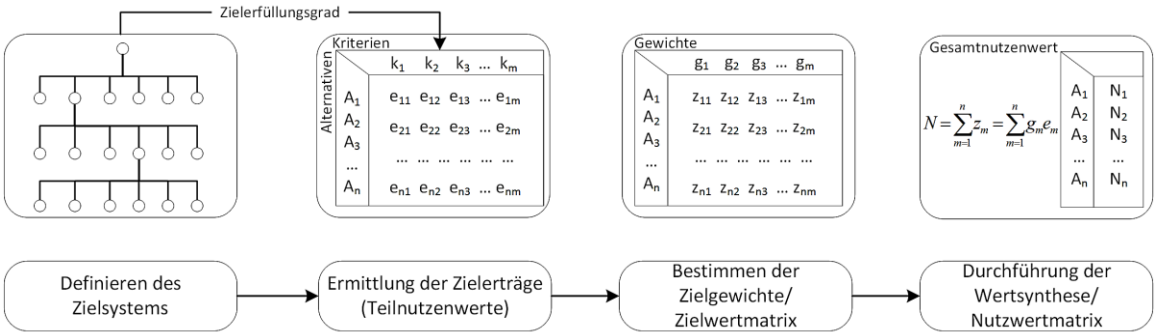


Abbildung 32: Ablauf der Nutzwertanalyse (mod. nach (Zangemeister 2014)). *Die Nutzwertanalyse ermittelt einen Erwartungswert (Zielertrag) anhand einer Nutzenfunktion und verrechnet diese mit den Gewichtungen der Kriterien, um eine Wertsynthese durchzuführen.*

überführt. Diese Nutzenfunktionen beschreiben die Wertvorstellung des ET in Abhängigkeit der Kriterienausprägung. Dazu sind in der Literatur unterschiedliche Ansätze wie bspw. die *Halbierungsmethode* (Eisenführ et al. 2010) oder die *Direct-Rating* Methode (Keeney und Raiffa 1994) zu finden[75]. Daraus werden in Verbindung mit den entsprechenden Gewichtungen der Kriterien die Zielwerte z bestimmt. Abschließend werden die Teilnutzen über eine Entscheidungsregel in einen Gesamtnutzen überführt. Die detaillierte Abfolge der Nutzwertanalyse kann bei (Zangemeister 2014) nachgelesen werden.

Die verbreitete Anwendung dieses Verfahrens hat zu einem zunehmend unkritischen Umgang mit Ergebnissen von Bewertungsverfahren geführt (Zangemeister 2014). Bei vielen Entscheidungsproblemen in der Planung werden Alternativen auf der Grundlage des mit der Nutzwertanalyse ermittelten Gesamtnutzwertes ausgewählt. Die Entscheidung anhand des höchsten Punktwertes bei verschiedenen Alternativen ist einfach und bequem, insbesondere bei häufig in der Praxis unter Zeitdruck stehenden ET. Nach (Müller-Herbers 2007) entspricht sie jedoch häufig nicht der gebotenen Sorgfalt und Angemessenheit bei komplexen planerischen Entscheidungen, bei denen die unterschiedlichsten und z.T. gegensätzlichen Beurteilungsaspekte gegeneinander abzuwägen sind. Diese sind dann allerdings nicht mehr nachvollziehbar. Die weitverbreitete Anwendung führte zu einer kritischen Auseinandersetzung mit der NWA (Eekhoff et al. 1981). Im Mittelpunkt dieser Kritik standen speziell die folgenden Punkte:

- die Quantifizierung nicht-quantifizierbarer Aspekte, insbesondere die Transformation in Zielerträge.
- lineare Verläufe der Transformationsfunktionen (welche die unterschiedlichen Wertdimensionen auf eine gleiche Ebene bringen), wodurch dem Problem eine real nicht existierende Linearität zugeschrieben wird.
- kardinale Skalierung der Gewichtungen durch den „kognitiv begrenzten" Entscheider (Strassert 1981).
- Nutzenunabhängigkeit zwischen den Kriterien (es darf keine Wechselwirkung bzw. Anhängigkeit zwischen den Kriterien bestehen).
- keine Berücksichtigung von Wertunterschieden bei einem engen Wertebereich der Kriterien (kleine Unterschiede in der Ausprägung werden direkt als Vorteil angesehen).

„Heute ist die Bedeutung der NWA – aufgrund der oben genannten Probleme – relativ gering" (Harth 2006). Vereinzelt kommen noch Varianten der NWA in der Luftfahrt vornehmlich in vereinfachter Form zur Anwendung (Harris und Li 2015). Die NWA ist allerdings methodische Grundlage für andere Verfahren, wie z.B. den *Analytischen Hierarchieprozess* (AHP), welcher eine weite Verbreitung in der Luftfahrt besitzt (Gkirgkis et al. 2017; Dožić und Kalić 2014) und im Anhang in abgewandelter Form zur Gewichtungsfindung behandelt wird (siehe Anhang, Kapitel 6). Aus diesem Grund soll der *AHP* hier nicht erneut aufgeführt werden.

[75] Die einfachste Variante besteht darin, der minimalen Ausprägung den geringsten partiellen Nutzenwert und der maximalen Ausprägung den höchsten Nutzenwert zuzuweisen.

4.3.2.2 TOPSIS

TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) basiert auf der Zielsetzung, dass die "beste" Alternative den kleinsten Abstand zur optimalen Lösung und den größten Abstand zur schlechtesten Lösung hat. Dieser Abstand wird dabei mit der *Euklidischen Distanz* berechnet. Ausgangspunkt ist eine Entscheidungsmatrix, welche die Kriterienausprägungen für die betrachteten Alternativen enthält. Anschließend sind folgende Schritte notwendig:

1. Normalisieren der Entscheidungsmatrix

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}}; \; i = 1,2,\ldots,m; \; j=1,2,\ldots,n \tag{3}$$

2. Berechnung der gewichteten Entscheidungsmatrix

$$r_{ij} = w_j z_{ij}; \; i = 1,2,\ldots,m; \; j=1,2,\ldots,n$$

3. Ermittlung der idealen (A^*) und schlechtesten Lösung (A^-) über Kosten bzw. Nutzenkriterien:

$$A^* = \left(\left(\max_i r_{ij} \mid j \in J^+\right), \left(\min_i r_{ij} \mid j \in J^-\right); i = 1,2,\ldots,m\right) = \left\{x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*\right\}$$
$$A^- = \left(\left(\min_i r_{ij} \mid j \in J^+\right), \left(\max_i r_{ij} \mid j \in J^-\right); i = 1,2,\ldots,m\right) = \left\{x_1^-, x_2^-, \ldots, x_n^-\right\}$$

Grundsätzlich wird bei *TOPSIS* zwischen Kostenkriterien und Nutzenkriterien unterschieden. Bei Kostenkriterien ist die beste (schlechteste) Kriterienausprägung der minimale (maximale) Wert, während diese bei Nutzenkriterien der maximale (minimale) Wert ist (Peters und Zelewski 2007). J beschreibt dabei die Zielfunktion. J^+ zeigt eine Maximierung und J^- eine Minimierung der Kriterienausprägung als optimal an. Dadurch ergibt sich die ideale Lösung aus den optimalen Werten aller Kriterien und würde damit eine absolut dominante Alternative darstellen. Die allgemein schlechteste Lösung ergibt sich jeweils aus den schlechtesten Kriterienausprägungen. Damit wird eine Skala definiert, welche sich auf die betrachteten Alternativen bezieht. Gleichzeitig ist es möglich, eine Skala mit globalen Schwellwerten zu definieren, welche die optimalen und schlechtesten Ausprägungen vorgeben, wodurch das Ergebnis unabhängig von den betrachteten Alternativen wird und eine globale Gültigkeit entsteht.

4. Berechnung der Distanz einer jeden Alternative zur positiven und negativen Lösung. Das Abstandsmaß ist die *Euklidische Distanz*, welche den Abstand zwischen den zwei Punkten im mehrdimensionalen Bewertungsraum misst.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} \left(r_{ij} - x_j^*\right)^2}; i = 1,2,\ldots,m$$
$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} \left(r_{ij} - x_j^-\right)^2}; i = 1,2,\ldots,m \tag{4}$$

5. Berechnung der relativen Nähe zur idealen Lösung und Bildung der abschließenden Rangfolge

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}; i = 1,2,...,m \tag{5}$$

Die beste Lösung (höchster Wert von C_i^*) ergibt sich aus der Nähe zur optimalen Lösung. Diese kann über eine *Pareto Front* wie in Abbildung 33 visualisiert werden. Dieser ermittelt allerdings nicht die beste Lösung, sondern eine Reihe von nicht dominierten (Pareto-optimalen) Lösungen. Die ideale Lösung befindet sich im Koordinatenursprung, wodurch die Lösung A aufgrund des geringsten Abstandes als geeignetste Alternative erscheint[76].

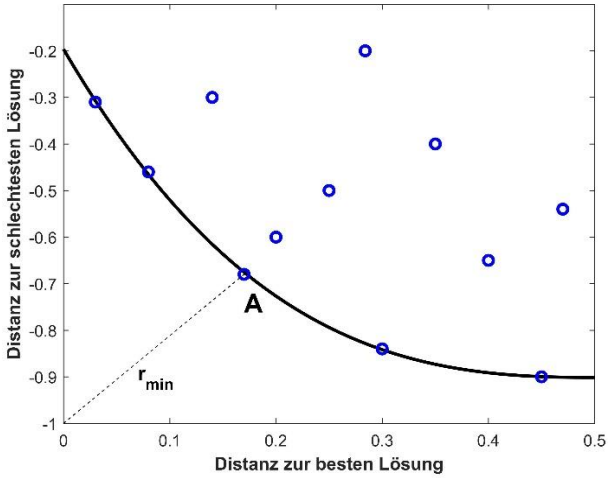


Abbildung 33: Pareto Front für die relative Nähe qualitativer Alternativen zur besten Lösung. *Die beste Lösung wäre aufgrund des minimalen Abstandes zur besten Lösung und des maximalen Abstands zur schlechtesten Lösung im Koordinatenursprung. Die geeignetste Lösung ergibt daher zu Alternative A aufgrund des geringsten Abstandes zum Koordinatenursprung.*

TOPSIS geht davon aus, dass jedes Kriterium einen monotonen Nutzen aufweist, d.h. eine bessere Ausprägung in einem Kriterium wird direkt als Vorteil gewertet. Damit würde sich ebenfalls eine Problemstellung bei einer Satisfizierung oder Fixierung als Zielfunktion ergeben (Hwang und Yoon 1981), da diese nicht berücksichtigt werden können. Weiterhin ist *TOPSIS* sehr empfindlich bzgl. der Gewichtungsverteilung (Sun 2012) und unterstellt die kardinale Messbarkeit aller Kriterienausprägungen. Sofern einige Kriterienausprägungen nur auf einem ordinalen Skalenniveau gemessen werden können, kommt es bei der Ermittlung der Abstände zu einem Skalenbruch (Peters und Zelewski 2007).

4.3.2.3 Outranking Verfahren am Beispiel von *PROMETHEE*

Diese Vorgehen berücksichtigen Entscheidungssituationen mit unvollständigen und unpräzisen[77] Aussagen. Der Begriff *Outranking*[78] kann mit *„Präferenz-Relation“* oder auch als *„wichtiger sein“* übersetzt werden, d.h. es wird im Rahmen eines Paarvergleiches in beide Richtungen ermittelt, inwieweit bspw. eine Alternative bzgl. einer anderen präferiert wird und umgekehrt (Geldermann 2014). Das Ziel der Outranking-Methoden liegt in der Informationsgenerierung sowie in der Strukturierung der Ergebnisermittlung, um diese transparenter zu gestalten (Geldermann 2014). Der ET soll sich eher des Problems

[76] Diese kann allerdings mit dem Konzept der *Pareto Fronten* nicht bestimmt werden. Dazu wurde die Euklidische Distanz in *TOPSIS* genutzt.

[77] der ET ist sich seinen Präferenzen nicht vollständig bewusst, wodurch eine Unterstützung erforderlich ist, welche auch widersprüchliche Informationen verarbeiten kann

[78] Umfangreiche Ausführungen zu den Outranking Konzepten lassen sich bei (Roy 1996) finden

und der dafür relevanten Aspekte bewusst werden, um hierüber ein besseres Verständnis für das Entscheidungsproblem zu entwickeln und somit eine fundierte Entscheidung treffen zu können (Geldermann 2014). Zudem sollen die Konsequenzen der eigenen Annahmen – wie z.B. der subjektiven Kriteriengewichtungen – verdeutlicht werden. Die bekanntesten *Outranking*- Methoden sind *Electre* (*Elimination Et Choice Translation Reality*) und *Promethee* (*Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*). Weitere Methoden sind unter anderem bei (Guitouni und Martel 1998; Greco et al. 2016) zu finden. Als größter Nachteil bei *Electre* wird von (Zimmermann und Gutsche 1991) die notwendige Wahl von Schwellwerten kritisiert, welche willkürlich erscheinen und durch *Promethee* beseitigt werden. Aus diesem Grund soll im Folgenden nur *Promethee* betrachtet und näher erläutert werden.

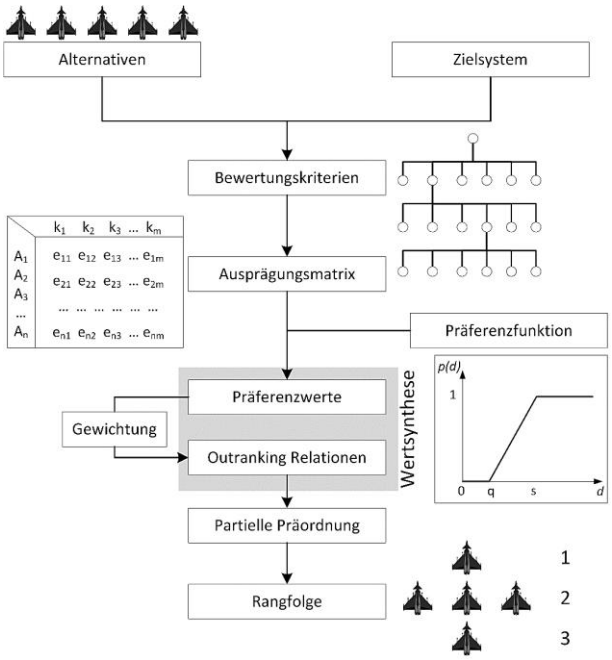


Abbildung 34: Vorgehen von *Promethee*. *Der große Vorteil von Promethee ist die Berücksichtigung der Präferenzfunktionen, wodurch individuelle Besonderheiten des Bewertungsproblems in dem Ergebnis beachtet werden können.*

Bei *Promethee* werden Präferenzfunktionen betrachtet, welche die Vorzüge des ET oder teilnehmender Fachleute für eine Alternative gegenüber einer anderen abbilden (Wertfunktion, siehe Kapitel 4.2.2.2). Weiterhin unterscheidet sich *Promethee* von den klassischen Bewertungsverfahren dadurch, dass keine vollständige Kompensation zwischen den Kriterien erfolgt (Geldermann 2014). Als Ergebnis wird die beste Alternative hinsichtlich der Mehrfachzielsetzung ermittelt, was mit dem besten Kompromiss aus Stärken und Schwächen gleichzusetzen ist. Für diese Methode existieren aufgrund der weitreichenden Beliebtheit diverse Abwandlungen und Modifikationen[79]. Auf die genauen Unterschiede der einzelnen Verfahren soll nicht detailliert eingegangen werden. Dazu sei an dieser Stelle auf (Brans und Mareschal 2005) verwiesen. Das folgend vereinfacht aufgezeigte Vorgehen wurde aus (Brans und Mareschal 2005) entnommen. Die allgemeine Vorgehensweise ist in Abbildung 34 skizziert. Generell besteht das Vorgehen aus den Schritten:

1) Bestimmung der Gewichtung w_j für jedes Kriterium j:

Die Gewichtung (siehe Kapitel 4.2.2.1) drückt die relative Bedeutung des Kriteriums gegenüber den anderen Kriterien aus und ist mit entsprechenden Methoden abzuleiten. *Promethee* stellt dazu kein eigenes Vorgehen bereit.

79 Vgl. (Brans und Mareschal 2005)

2) Definieren der *Präferenzfunktion* (siehe Kapitel 4.2.2.2) für jedes Kriterium und Bestimmung der resultierenden Präferenzwerte $p_j(d)$ aus den Paarvergleichen, wobei A_i und A_{i^*} die Ausprägungen (zweier betrachteter Alternativen im Paarvergleich) eines Kriteriums beschreibt:

$$p_j(d) = p_j(f_j(A_i) - f_j(A_i^*)) \tag{6}$$

Mit Hilfe der Präferenzfunktion wird vom ET zum Ausdruck gebracht, inwieweit eine Differenz zwischen den einzelnen Ausprägungen eines Kriteriums zu einem Vorteil führt. Für jedes Kriterium ist somit eine Präferenzfunktion zu definieren, wozu in unterschiedlichen Literaturquellen standardisierte Funktionsverläufe zu finden sind (Brans und Mareschal 2005; Podvezko und Podviezko 2010). Es besteht auch die Möglichkeit, individuelle Verläufe zu definieren. Eine standardisierte Präferenzfunktion ist in Abbildung 35 dargestellt. Dieser Verlauf lässt sich bspw. bei dem Paarvergleich der *Instationären Wenderate* definieren. Nach (Herbst 1980) besteht ein Vorteil im Luftkampf erst dann, wenn eine Differenz zwischen den Wenderaten von 3°/s besteht, d.h. unterscheidet sich die *Instationäre Wenderate* weniger als diese 3°/s, so besteht kein taktischer Vorteil und damit auch keine Präferenz einer Alternative. Dies wird durch den indifferenten Bereich bis *q* verdeutlicht, welches in diesem speziellen Fall 3°/s entspricht. Ab diesem Punkt entsteht eine lineare Präferenz bis zu einer maximalen Differenz *s*.

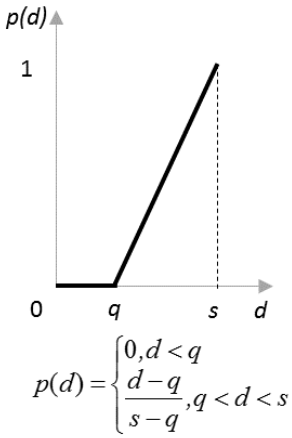


Abbildung 35: V-Shape Präferenzfunktion mit Indifferenz. *Funktion zeigt indifferenten Bereich und anschließend einen linearen Anstieg.*

Ausgehend davon wird für jeden Paarvergleich *i* aufgrund der Differenz *d* in der Ausprägung $f_j(A_i)$ des entsprechenden Kriteriums *j* ein Präferenzwert $p_j(d)$ abgeleitet.

3) Ableitung der Outranking Relationen π durch gewichtete Paarvergleiche:

Allgemein lässt sich die Outranking-Relation als Maß für die Präferenz einer Alternative bzgl. einer anderen verstehen. Diese kann ähnlich der Präferenzfunktion einen Wert zwischen 0 (Indifferenz) und 1 (strikte Präferenz) annehmen. Die Relation von Alternative *i* zu Alternative i^* ergibt sich aus der Summe der gewichteten Präferenzwerte (*k* ist die Anzahl der Kriterien):

$$\pi(A_i, A_{i^*}) = \sum_{j=1}^{k} w_j \cdot p_j(f_j(A_i) - f_j(A_{i^*})) \tag{7}$$

4) Berechnung der Aus- und Eingangsflüsse:

Diese zwei Flussgrößen sind ein Maß für die Vor- und Nachteile der Alternativen untereinander. Der Ausgangsfluss Φ^+ beschreibt die normierte Summe der Outranking Relationen, wodurch ein Maß für die Vorteile einer Alternative gegenüber einer anderen ermittelt wird (*n* ist die Anzahl der Alternativen). Damit wird dargestellt, wie stark eine Alternative bevorzugt wird.

$$\Phi^+(A_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} \pi(A_i, A_{i^*}) \tag{8}$$

Der Eingangsfluss Φ^- beschreibt hingegen, wie stark eine Alternative von den anderen dominiert wird.

$$\Phi^-(A_i) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n} \pi(A_{i^*}, A_i) \tag{9}$$

5) Ableitung der Rangfolge aus der Partiellen Präordnung:

Bei der Ermittlung der Partiellen Präordnung werden bei *Promethee I*[80] neben den Präferenzen und Indifferenzen auch Unvergleichbarkeiten berücksichtigt. Diese entstehen, wenn eine Alternative einen höheren Ausgangsfluss, aber gleichzeitig auch einen höheren Eingangsfluss aufweist. Es *„liegt nur eine Präferenz vor, wenn eine Alternative sowohl einen größeren Ausgangsfluss als auch einen kleineren Eingangsfluss"* (Geldermann 2014) besitzt. Zur Berechnung der Partiellen Präordnung werden die Aus- und Eingangsflüsse zu einem Nettofluss verrechnet und gleichzeitig die Unvergleichbarkeiten berücksichtigt, wodurch eine eindeutige Rangfolge entsteht.

Der Nettofluss berechnet sich aus:

$$\Phi(A_i) = \Phi^+(A_i) - \Phi^-(A_i) \tag{10}$$

In *Promethee* wird das Ausmaß der aggregierten relativen Stärken und Schwächen getrennt ermittelt und kann dadurch weiterführend grafisch ausgewertet werden. Zur Abbildung von Unvergleichbarkeiten in einzelnen Kriterien können Indifferenzschwellwerte modelliert werden. Die dazu genutzten individuell formulierbaren Präferenzfunktionen stellen einen direkten Bezug zur Bewertungsaufgabe her und eliminieren weiterhin die Skalenproblematik aufgrund der Ableitung metrischer Präferenzwerte.

4.3.2.4 Methodenauswahl

In Kapitel 3.2 wurde die vielfältige Nutzung unterschiedlicher MCDA- Methoden zur Bewertung von Luftfahrzeugen gezeigt. Dabei wurde jedoch keine objektive Eignung der einzelnen Methoden zur Anwendung im TCEP abgeleitet. Die Anforderungen zur Ermittlung der Methoden für die Einzelbewertung der Alternativen – abgeleitet von den Konzeptanforderungen aus Kapitel 2.3.2 – sind:

A1.2 Holistische Betrachtung der Systemfähigkeiten

A1.2.1 *Skalenunabhängigkeit*: Berücksichtigung von Ausprägungen auf unterschiedlichen Skalen

[80] Es gibt mehrere Modifikationen der Methode *Promethee*. Bei *Promethee II* wird der Nettofluss aus der Differenz der Eingangs- und Ausgangsflüsse gebildet. Nachteil ist, dass ähnlich wie bei der Nutzwertanalyse eine vollständige Kompensation der Stärken und Schwächen der Alternativen möglich ist und so ein gewisser Informationsverlust entsteht (Oberschmidt 2009). Nach *Promethee I* wird eine partielle Präordnung der Alternativen basierend auf einem Vergleich der Eingangs- und Ausgangsflüsse unter der Berücksichtigung von Stärken und Schwächen gebildet, so dass direkt Unvergleichbarkeit ermittelt werden können.

A1.3 Berücksichtigung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen[81] zwischen den Fähigkeiten bzw. Kriterien

A1.3.1 *Beziehungen*: Berücksichtigung von Abhängigkeiten (ersetzend oder voraussetzend) siehe Kapitel 4.2.3.7.2

A1.5 Berücksichtigung der Wertvorstellungen des ET

A1.5.1 *Präferenzen*: Berücksichtigung von Präferenzen und variable Formulierung des Präferenzmaßes eines Kriteriums

A1.5.2 *Unsicherheiten*: Berücksichtigung von Unsicherheiten durch subjektive Präferenzen

A3.1 Plausible Ermittlung der Bewertungsergebnisse auf unterschiedlichen Detailstufen mit Hilfe eines Erfüllungspotentials

A3.1.1 *Nachvollziehbarkeit*: Transparente Prozessschritte und verständliche Aufbereitung der Ergebnisse sind wichtig für die Legitimierung der Entscheidung vor den Stakeholdern.

A3.1.2 *Objektivität*: Objektivierung der Ergebnisermittlung trotz subjektiver Einflüsse

A3.1.3 *Reliabilität*: Ein wiederholter Durchlauf führt bei unveränderten Rahmenbedingungen zum gleichen Ergebnis.

A3.1.4 *Intersubjektivität*: Nach der Festlegung des Zielsystems sollen die Ergebnisse von den Einflüssen des ET unabhängig sein. Bewertungsverfahren können für sich intersubjektive Gültigkeit beanspruchen, wenn sie für Dritte nachvollziehbar sind (Harth 2006).

A5.3 Berücksichtigung konfliktärer Kriterien und fachspezifischen Expertenwissens zur Ergebnisberechnung

A5.3.1 *Kompensation*: Minimierung des Ausgleichs von Stärken und Schwächen bei der Aggregation

A5.3.2 *Unvergleichbarkeiten*: Berücksichtigung von Indifferenzen bei Wertunterschieden (nicht jeder Unterschied in der Ausprägung ist ein Vorteil)

Bei den einzelnen Methoden dieses Abschnittes wurden bereits Vor- und Nachteile aufgeführt. Die Erfüllung der obigen Anforderungspunkte wird in Tabelle 11 aufgezeigt. Bezüglich eines ausführlichen Vergleichs der *kompensatorischen* Verfahren mit entsprechenden Vor- und Nachteilen sei an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen. Allgemein sei erwähnt, dass der *Analytische Hierarchieprozess* und die *Nutzwertanalyse* einen eindimensionalen Nutzenwert betrachten und damit bei der Aggregation der Wertfunktionen ein Informationsverlust entsteht. Weiterhin werden Kardinalskalen vorausgesetzt, woraus ein eindimensionaler Präferenzindex ermittelt wird. Im Gegensatz dazu vermeiden die *Outranking*-Verfahren diese Kompensation und betrachten zusätzlich Ordnungsrelationen, wodurch Indifferenzen

[81] Die Wechselwirkungen sind bei den Berechnung der Kriterienausprägungen zu berücksichtigen. Bei der Verrechnung der Datenbasis zu einem Bewertungsergebnis haben diese keinen Einfluss.

berücksichtigt werden können. Grundlage für die Ergebnisbestimmung sind nicht die Werte als solche, sondern die Beziehung zwischen diesen Werten (Relationen). Eine grafische Darstellung der Ergebnisse in Form von Paarvergleichsflüssen erleichtert die Nachvollziehbarkeit. *Promethee* bietet durch die Formulierung der Präferenzfunktionen die Möglichkeit, die Bedeutung der Differenzen für jedes Kriterium einzeln darzustellen. Diese werden weiterhin durch Schwellwerte begrenzt. Der erhöhte Aufwand zur Bestimmung dieser Funktionen und der zugehörigen Parameter resultiert in einer gut nachvollziehbaren Ableitung des Bewertungsergebnisses.

	Anforderung									
	Skalenunabhängigkeit	Beziehungen	Präferenzen	Unsicherheiten	Nachvollziehbarkeit	Objektivität	Reliabilität	Intersubjektivität	Kompensation	Unvergleichbarkeiten
Methode	**1.2.1**	**1.3.1**	**1.5.1**	**1.5.2**	**3.1.1**	**3.1.2**	**3.1.3**	**3.1.4**	**5.3.1**	**5.3.2**
SAW	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
MAVT/MAUT	+	-	-	o	o	o	+	o	-	-
NWA	+	-	o	-	o	o	+	+	-	-
AHP	+	-	-	-	o	-	-	-	-	o
Topsis	o	-	o	+	+	+	+	+	o	-
Promethee	+	-	+	+	+	+	+	+	o	+
Electre	o	-	+	+	-	+	+	+	+	o
NAIDE	-	-	-	+	-	o	+	o	+	-

Tabelle 11: Überblick über die Erfüllung der Anforderungspunkte der Methoden. *Es wird deutlich, dass die Methode PROMETHEE die besten Voraussetzungen bietet, um die Vielzahl an Daten und die gegebenen Präferenzen zu verarbeiten. (+: erfüllt, -: nicht erfüllt, o: teilweise erfüllt)*

Nach (Reeg 2009) ist *Promethee* den Verfahren *Electre* und *NAIDE* vorzuziehen, da dieses durch die Abbildung nichtlinearer Präferenzen und Unsicherheiten einen erheblichen Vorteil besitzt. Außerdem werden in *NAIDE* keine Gewichtungen berücksichtigt, was dieses Verfahren gänzlich ausschließt. *Promethee* besitzt weiterhin eine positive Auswirkung auf die Stabilität des Ergebnisses (Rohr 2004). Die Präferenzindizes sind informationsreicher und spiegeln die Präferenzstärke des ET besser wieder, womit allerdings gleichzeitig ein erhöhter Implementierungsaufwand und eine umfangreichere Datengrundlage entsteht[82]. Outranking-Verfahren wie *Promethee* sind weitaus komplexer als der *AHP* oder die *Nutzwertanalyse*, was zu deutlich selteneren Untersuchungen und Anwendungen in unterschiedlichen Forschungsbereichen geführt hat.

[82] *Promethee* bietet ebenfalls die Möglichkeit, Präferenzfunktionen in Abhängigkeit des Wertebereiches der Kriterienausprägungen zu formulieren. Bei der sogenannten *Fuzzy-Promethee* werden mehrere Präferenzfunktionen pro Kriterium abgebildet. Dadurch kann bspw. festgelegt werden, dass eine Differenz zwischen hohen Ausprägungen zu niedrigeren oder höheren Präferenzwerten führt als die gleiche Differenz zwischen Ausprägungen in mittleren oder niedrigen Bereichen (Zimmer 2016). Damit ist die Präferenzfunktion nicht nur von dem Kriterium, sondern auch von dessen Ausprägung abhängig. Auch wenn

Aus Tabelle 11 wird deutlich, dass die beste Erfüllung der Anforderungen von *Promethee* erreicht wird. Eine detaillierte subjektive sowie objektive Untersuchung der einzelnen Methoden mit einer Anwendung an einem Aufklärungsszenario zur Bewertung von UAVs wurde bei (Quadt 2018) durchgeführt. Darin hat sich gezeigt, dass vorwiegend *Promethee* in der Lage ist, die detaillierten Wertvorstellung der ET zu berücksichtigen. Insbesondere der Vorteil von *Promethee*, spezifische Präferenzen in detaillierten Abstufungen berücksichtigen zu können, hat dazu geführt, dass diese Methode für die Bewertung luftgestützter Plattformen in dieser Arbeit priorisiert Anwendung findet. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden ebenfalls die geeigneten Methoden *Topsis, NWA* und *SAW* implementiert, um das ermittelte Ergebnis hinsichtlich der Rangfolge verifizieren zu können (Oberschmidt 2009). Wie aus Tabelle 11 zu erkennen ist, ermöglichen die Methoden keine Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Fähigkeiten und Kriterien. Dazu wurden die Berechnungsvorschriften der Methoden (*Promethee*, *Topsis*, *SAW*, *NWA*) soweit angepasst, dass diese Abhängigkeiten bei der Berechnung des Systempotentials einfließen.

4.3.3 Sensitivitätsanalyse

Ein oft vernachlässigter Aspekt von DSS sind nach (Belton und Vickers 1990) Sensitivitätsanalysen (SA). Damit kann die Robustheit des Bewertungsergebnisses nachgewiesen und darauf aufbauend die Auswirkungen von Änderungen abgeschätzt werden. Diese Robustheit wurde als Anforderung an das DSS formuliert (Kapitel 2.3, A4.1). In der SA werden die Eingangsvariablen wie Gewichtung des gewählten Kriteriums und die Ausprägungen der betrachteten *Elementaren Kriterien* in vorgegebenen Grenzen variiert und die Auswirkungen auf das SPP betrachtet (Weber 1993). Damit kann der Unsicherheit begegnet werden, welche bei der Nachprojektierung von Luftfahrzeugen, bei der Berechnung der Ausprägungen mit Berechnungsmodulen oder der subjektiven Vergabe der Gewichtungen entstehen.

Speziell durch die Unsicherheiten bei den Eingangsparametern in frühen Entwurfsstadien (Konzeptideen) oder auch bei der Betrachtung fremder Waffensysteme entstehen Abweichungen zum tatsächlichen Ergebnis, welche ebenfalls zu berücksichtigen sind. Weiterhin können damit gewisse Unsicherheiten bei der Formulierung der Präferenzen durch den ET oder entsprechender Fachleute berücksichtigt und deren Auswirkungen auf das Gesamtergebnis abgeschätzt werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Arten von Sensitivitätsanalysen (SA) (Helton 2011) zu nennen. Die *lokale* SA variiert die Eingangsvariablen einzeln, während die übrigen Variablen konstant gehalten werden. Diese Art der SA kann eine erste Abschätzung der Auswirkungen einzelner Veränderungen geben, jedoch keine Interaktionen zwischen den Eingangsvariablen ermitteln. Die *globale* SA variiert alle Eingangsparameter über den gesamten Bereich und untersucht deren Einflüsse in Form von Korrelationen (Helton 2011).

---

dies als Stärke bezeichnet werden kann, ist damit eine erhöhte Komplexität verbunden, wodurch die Bewertung intransparenter und die Akzeptanz reduziert werden könnte. Untersuchungen bei (Zimmer 2016) zwischen *Promethee* und *Fuzzy-Promethee* haben lediglich marginale Unterschiede in der Ergebnisgenauigkeit und damit keinen Mehrwert vor dem Hintergrund der höheren Komplexität feststellen können.

4.3.3.1 Lokale Sensitivitätsanalyse

Durch die methodisch unterstützte, allerdings immer noch subjektive Ermittlung der Gewichtungsverteilung entstehen Unsicherheiten innerhalb der Datenbasis, welche analysiert werden müssen. Dabei ist speziell zu untersuchen, welche Auswirkungen diese Parameter auf das SPP und damit die Rangfolge haben. Ein weiterer Parameter – welcher mit Unsicherheiten behaftet ist – sind die Ausprägungen, welche von der Genauigkeit der Datensätze der betrachteten Luftfahrzeuge abhängig sind. Diese werden noch gesondert in Kapitel 5.3.1 betrachtet und in Kapitel 6.2.1 verifiziert. Trotz eines verifizierten Datensatzes kann dieser die Realität nicht 100-prozentig abbilden. Weiterhin stellen die Berechnungsmodule selbst auch nur ein vereinfachtes Abbild der Realität dar. Damit ist es notwendig, diesen Einfluss unsicherer oder unscharfer Werte auf das Ergebnis durch SA offenzulegen.

Ein weiterer Nutzen dieser Analysen speziell bei zeit- und kostenintensiven Auswahlentscheidungen ist die Fokussierung auf treibende Faktoren. Kann bspw. analysiert werden, dass die Gewichtung eines bestimmten Kriteriums keinen Einfluss auf die Rangfolge hat (Robustheit), so können intensive Überlegungen und Diskussionen in diesen Bereichen abgekürzt werden, was wertvolle Ressourcen für die Bearbeitung sensibler Parameter freigibt[83]. Ein instabiles Ergebnis liegt vor, wenn die Grenzen für eine Alternierung der Rangfolge dicht bei den aktuellen Werten für die Gewichtung oder Ausprägungen liegen.

In der Literatur wurden durch (Eisenführ et al. 2010) prinzipielle Erkenntnisse im Hinblick auf Gewichtungsfindungen formuliert, welche eine gewisse Unsicherheit bestätigen.

- Gewichtungsverteilung haben maßgeblichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis
- Kriterien werden oft höher gewichtet, wenn diese dekomponiert wurden (*Splitting Effekt*)
- Je höher ein Kriterium in der Hierarchie steht, desto höher wird dessen Gewicht eingeschätzt

Dazu wurde bereits in Kapitel 4.2.2.1 eine probate Vorgehensweise zur Ermittlung der Gewichtungsverteilung diskutiert und im Anhang beschrieben.

Die lokale SA (Abbildung 36) beginnt mit der Definition des Eintrages innerhalb der Struktur, für den eine SA durchgeführt werden soll. Für diesen Eintrag werden die entsprechenden Kindkriterien ermittelt. Anschließend werden die Gewichtung des gewählten Kriteriums und die Ausprägungen aller untergeordneten *Elementaren Kriterien* variiert. Dabei ist die Bandbreite für die Gewichtungen 0-100% und für die Ausprägungen vordefinierte Unsicherheitsgrenzen (±10%). Nach jedem Durchlauf wird mit der angewählten MCDA- Methode das SPP

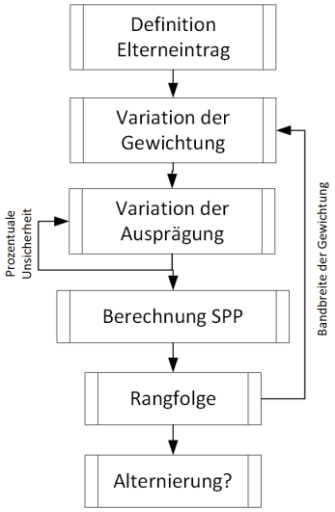


Abbildung 36: Prozessdiagramm der lokalen Sensitivitätsanalyse. *Die Parameter sind die Gewichtungen und die Ausprägungen, welche in vorgegebenen Grenzen variiert und deren Auswirkungen auf die Rangfolge analysiert werden.*

[83] Diese Aussagen wurden von militärischen Auswahlentscheidern getätigt.

und die Rangfolge ermittelt. Anschließend wird überprüft, ob sich diese von der initialen Rangfolge unterscheidet.

Zusätzlich werden die Gewichtungen bestimmt, bei denen sich eine Alternierung einstellt. Dabei werden alle Rangfolgen betrachtet, so dass bspw. auch die kritische Gewichtung für eine Alternierung des letzten und vorletzten Platzes ermittelt wird. Diese sind allerdings weniger wichtig als die kritischen Gewichtungen für eine Änderung der ersten Platzierung. Dazu wurde ein Suchalgorithmus implementiert, welcher in Kapitel 5.4.2 genauer beschrieben wird.

4.3.3.2 Globale Sensitivitätsanalyse

Die globale SA erlaubt die simultane Variation aller Eingangsvariablen über den kompletten Wertebereich. Dazu wurden viele Vorgehen entwickelt, darunter zählen bspw. das *Monte-Carlo Verfahren* (Roesler et al. 2002), die *Korrelationsanalyse* oder die *Varianzanalyse* (Backhaus 2010). Bei der Bewertung luftgestützter Systeme ergeben sich angesichts der Subjektivität der Gewichtungsfindung und der Präferenzen gewisse Unsicherheiten, welche merkliche Einflüsse auf das Entscheidungsergebnis haben können (Sun 2012). Zur Behandlung dieser Unsicherheiten wurden statistische Verfahren implementiert, welche eine globale SA ermöglichen. Damit können die statistischen Abhängigkeiten zwischen den Eingangs (Präferenzinformationen, Ausprägungen)- und Ausgangsvariablen (Systempotential) des Bewertungsprozesses beschrieben werden. Dazu wird die Assoziation zwischen zwei Variablen gemessen, welche dann vorliegt, wenn ein Wert einer Variablen Informationen über den wahrscheinlichen Wert der anderen Variablen liefert (Backhaus 2010). Eine Korrelation zwischen den beiden Variablen existiert, wenn die Assoziation linear ist. Es gibt mehrere Korrelationskoeffizienten, welche diesen Assoziationsgrad messen, bspw. der *Pearson-Korrelationskoeffizient*, der *Spearman-Rangkorrelationskoeffizient* oder der *Kendall Korrelationskoeffizient* (Stuart 1956).

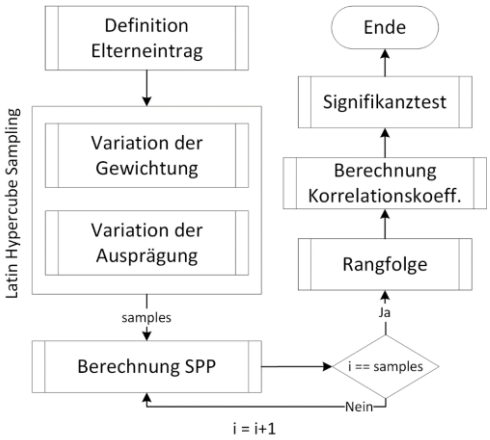


Abbildung 37: Flussdiagramm der Globalen Sensitivitätsanalyse. *Das Latin Hypercube Sampling stellt ein zielgerichtetes Vorgehen zur Abdeckung der Variablenbereiche dar.*

Nach (Sun 2012) stellt der Rangkorrelationskoeffizient nach *Pearson* einen populären Ansatz dar, um bei Entscheidungsanalyseprozessen die globale Empfindlichkeit der Rangordnung zu den Eingangsvariablen zu bestimmen. Dabei weist ein höherer Zahlenwert des Koeffizienten auf eine größere Auswirkung bzgl. der Rangfolge hin (Edwards 1980). Das Vorgehen zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten ist in dem Flussdiagramm in Abbildung 37 dargestellt. Die normierten Gewichtungen werden zwischen 0 und

1, die Ausprägungen in deren physikalischen Grenzen[84] variiert. Zur Variation der Eingangsparameter wurde die *Latin Hypercube Sampling* (LHS) Methode (Iman 2008) implementiert. Die Verteilung der Eingangsvariablen wird in N (*samples*) gleiche Intervalle unterteilt und jeder Wert zufällig abgetastet. Damit wird der gesamte Bereich der Variablen untersucht, so dass jede Kombination der Variablenwerte genau einmal verwendet wird (Sun 2012). LHS benötigt weniger Stichproben als einfache Verfahren, um die gleiche Genauigkeit zu erzielen. Das genaue Vorgehen der LHS kann bspw. bei (Roshanian und Ebrahimi 2013) nachgelesen werden. Für jede Kombination der Eingangsvariablen wird anschließend das Systempotential (SPP) ermittelt. Mit diesen Daten können die partiellen Rangkorrelationskoeffizienten berechnet werden, welche die monotone Beziehung zwischen Ein- und Ausgangsvariablen wiedergeben.

Zur Interpretation dieser Beziehung wird ein statistischer Signifikanztest in Form des p-Wertes vorgesehen, welcher die Signifikanz der partiellen Rangkorrelation beschreibt. Dieser Wert ist eine Wahrscheinlichkeit, welche den Erhalt eines identischen Stichprobenergebnisses beschreibt, wenn die Nullhypothese[85] wahr ist (Henkel 2004). Werte kleiner 0,05 zeigen eine statistische Signifikanz der Korrelation an. Eine Eingangsvariable wird damit als wichtig in der globalen SA identifiziert, wenn sie einen breiteren Bereich und einen größeren Empfindlichkeitskoeffizienten (partieller Rangkorrelationskoeffizient) aufweist.

4.3.4 Hauptkomponentenanalyse

Eine detaillierte Darstellung der Zwischenergebnisse sowie die Darstellung der einzelnen Stärken und Schwächen der betrachteten Luftfahrzeuge wurden als konzeptionelle Anforderung A3.2 in Kapitel 2.3.2 formuliert. Dabei ist eine entsprechende visuelle Aufbereitung notwendig. Die Nutzung multivariater Analysemethoden zur Unterstützung eben dieser visuellen Aufbereitung von Bewertungsergebnissen wurde bereits von (Stewart 1981) postuliert. Um dem ET eine übersichtliche grafische Darstellung des Bewertungsergebnisses zur Verfügung zu stellen, wurden von (Clarke und Rivett 1978) und (Rivett 1977) Versuche unter der Nutzung von multidimensionalen Skalierungstechniken unternommen, einen multidimensionalen Raum in einem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem darzustellen. Nach (Hodgkin et al. 2005) eignet sich die *Hauptkomponentenanalyse* als multivariate Analysemethode am besten, um eine Reduktion der Dimensionen auf zwei Hauptachsen bei gleichzeitig minimalem Informationsverlust zu erreichen (Backhaus 2010). Neben der visuellen Aufbereitung des Bewertungsergebnisses durch Datenreduktion können die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Alternativen und deren Kriterien identifiziert werden (Bertsch 2007).

Ziel ist es, die Daten einer Ausgangsmatrix in einem kartesischen Koordinatensystem geringerer Dimensionalität im Sinn der „kleinsten Quadrate“ darzustellen. Die Achsen des Zielsystems (*principal*

---

[84] Die Grenzen für die Abweichungen der Ausprägungen sind meist nicht bekannt. Daher sind sinnvolle Werte anzugeben, in denen sich die Ausprägungen verändern können. Diese können vom ET definiert werden. In dieser Arbeit wurden prozentuale Abweichungen (± 10%) von dem errechneten Wert genutzt.

[85] Die Nullhypothese beschreibt in der Statistik eine Annahme, welche es zu Überprüfen gilt. Die Nullhypothese wird aus dem Sachzusammenhang heraus als Negation der Arbeitshypothese formuliert, welche statistisch belegt werden soll. (http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/nullhypothese.html, zuletzt besucht am 01.09.2018)

components) sind dabei Linearkombinationen der ursprünglichen Variablen (Kriterien). Die ursprüngliche Dimension ergibt sich aus der Anzahl der *Elementaren Kriterien*, welche einen *n*-dimensionalen Raum aufspannen. Es wird eine orthogonale Transformation der ursprünglichen Variablen in eine neue Menge nicht korrelierter Variablen (Hauptkomponenten) vorgenommen (Oettinger 2017). Damit reduziert sich die Anzahl korrelierter Variablen und die Hauptkomponenten beschreiben eine maximale Varianz, was einem maximalen Informationserhalt entspricht (Härdle und Simar 2012).

4.3.4.1 Vorgehen

Die *Hauptkomponentenanalyse* ist ein Extraktionsverfahren der Faktorenanalyse (Backhaus 2010). Diese dient dazu, Strukturen in größeren Variablensets erkennen zu können. Diese Strukturen entstehen durch Überlappung der Variablen, deren Beziehungszusammenhänge insoweit strukturiert werden, als dass hochkorrelierte Gruppen (Faktoren) ermittelt, zusammengefasst und für eine Reduktion der Dimension genutzt werden können. Für Details bzgl. der Faktorenanalyse sei an dieser Stelle auf (Backhaus 2010) verwiesen.

Die Reduktion der Daten mittels der PCA erfolgt über mathematische Linearkombinationen, aus denen die Hauptkomponenten resultieren. Diese sind ähnlich den Regressionsgeraden, welche als lineares Muster den Datensatz am besten beschreiben. Die PCA besteht im Wesentlichen aus einer Rotation des ursprünglichen Koordinatensystems (beide Koordinatensysteme haben noch die gleiche Dimension *n*) und einer anschließenden Reduktion der Dimension durch die Nutzung einer begrenzten Anzahl der Hauptkomponenten (bei einem kartesischen Koordinatensystem werden nur die ersten beiden Hauptkomponenten betrachtet). Der dadurch nicht reproduzierbare Varianzanteil wird als Informationsverlust deklariert. In Abbildung 38 ist die Funktionsweise der PCA schematisch dargestellt. Mit der Methode der *„kleinsten Quadrate"* wird die erste Hauptkomponente gebildet. Die zweite Hauptkomponente klärt die Varianz auf, welche durch die erste Hauptkomponente nicht berücksichtigt wurde.

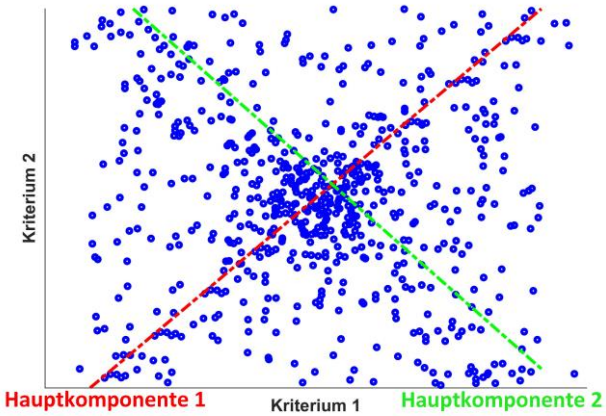


Abbildung 38: Ableitung der Hauptkomponenten aus einer Punktemenge. *Die rote Gerade (Hauptkomponenten 1) entsteht aus der Methode der „kleinsten Quadrate" und die grüne Gerade (Hauptkomponente 2) ergibt sich aus der Berücksichtigung der Varianz.*

Die folgenden Ausführungen stammen hauptsächlich aus (Grieser 1997). Ausgehend von einer Matrix *Z(t,x)* aus *m* Alternativen und *n* Kriterien (Zeitreihen)

$$Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,n} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{m,1} & z_{m,2} & \cdots & z_{m,n} \end{pmatrix}$$

wird für jeden Eintrag der Zeile der Mittelwert $\mu(Z)$ dieser Zeile abgezogen, um den Koordinatenursprung auf den Schwerpunkt der Punktwolke zu transformieren. Dadurch werden nur noch die Abweichungen vom Mittel untersucht. Aus der Ermittlung der Kovarianzmatrix wird darauf geschlossen, wie die Drehung des Systems durchzuführen ist (nach der Drehung soll keine Kovarianz zwischen den gedrehten Koordinaten existieren). Die Kovarianzmatrix ergibt sich aus:

$$\Sigma = \mathrm{cov}(Z - \mu(Z)) \,. \tag{11}$$

Die Forderung, dass zwischen den neuen Koordinaten keine Korrelation besteht, wird durch eine Diagonalisierung der Kovarianzmatrix erreicht. Die zu dieser Kovarianzmatrix gehörenden Eigenvektoren sind eine Linearkombination der alten Basisvektoren und drücken den Zusammenhang zwischen den alten und den neuen Zeitreihen aus (Grieser 1997). Die Eigenwerte der Kovarianzmatrix geben die Varianz in der neuen Koordinatenrichtung an. Dazu sind die Eigenwerte λ der Kovarianzmatrix Σ zu finden:

$$\det(\Sigma - \lambda I) = 0 \,. \tag{12}$$

Dabei stellt I die Einheitsmatrix dar. Somit lässt sich mit

$$(\Sigma - \lambda_i I) \cdot \vec{e_i} = 0 \tag{13}$$

der i-te Eigenvektor $\vec{e_i}$ bestimmen. Die x-te Komponente des i-ten Eigenvektors beschreibt damit das Gewicht, mit welchem das x-te Kriterium in die i-te neue Zeitreihe des gedrehten Systems eingeht (Grieser 1997).

Dabei sind die sortierten Eigenvektoren ein Maß für die Varianz, welche direkt den Informationsverlust beschreibt. Damit kann berechnet werden, wieviel Varianz durch die erste und zweite Hauptkomponente repräsentiert werden kann. Allgemein lässt sich das repräsentierte Maß der Varianz δ der ersten q Hauptkomponenten mit folgender Formel berechnen (Härdle und Simar 2012):

$$\delta_q = \frac{\sum_{i=1}^{q} \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}, q \leq n \tag{14}$$

Die exakte mathematische Theorie hinter der PCA ist komplex und kann bei (Härdle und Simar 2012) oder (Backhaus 2010) nachgelesen werden.

4.3.4.2 Interpretation der Ergebnisse

Die betrachteten Alternativen werden als Dreiecke und die *Elementaren Kriterien* als gerade Linien dargestellt. Durch die Mittelwertbildung wird das Zentrum der Alternativen auf den Koordinatenursprung projiziert, so dass sich eine imaginäre Alternative im Ursprung befindet, deren Ausprägung exakt die Mittelwerte der Kriterien aufweist (Belton und Stewart 2002).

Nah beieinanderliegende Alternativen zeigen ähnliche Charakteristiken, so dass diese eine ähnliche Eignung bzgl. des Potentials zur Erfüllung der Nutzenabsicht aufweisen. Große Abstände zwischen den Alternativen zeigen hingegen eine große Divergenz hinsichtlich des Erfüllungspotentials. Gleiches gilt für die Ausrichtung der Kriterien, welche als Strahlen abgebildet werden. Positiv korrelierte Kriterien zeigen in die gleiche Richtung, während negativ korrelierte Vektoren in entgegengesetzte Richtungen zeigen.

Orthogonale Vektoren zeigen eine Unabhängigkeit der Kriterien an (Geldermann 2014). Diese Zusammenhänge lassen sich in Abbildung 39 verfolgen. Es ist eine GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Assistance*) Ebene mit vier Alternativen und vier qualitativen Kriterien dargestellt. Diese Daten wurden wiederum mit der *Hauptkomponentenanalyse* auf zwei Dimensionen reduziert. Alle Kriterien zeigen in unterschiedliche Richtung, wodurch auf eine Unabhängigkeit der Kriterien untereinander geschlossen werden kann. Zeigt ein Kriterium in die Richtung einer Alternative, verdeutlicht dies eine Unterstützung der entsprechenden Alternative durch das Kriterium. Dies wird bspw. bei der Alternative C und der *Detektierbarkeit* deutlich. Die Ausrichtung zeigt, dass Alternative C die geringste und Alternative D die höchste *Detektierbarkeit* aufweist. Demgegenüber scheint Alternative D die kostengünstigste Wahl zu sein. Die Länge der Strahlen spiegelt die Wichtigkeit des Kriteriums für die Bewertung der Alternativen bzgl. der definierten Nutzenabsicht wieder. Eine lange Projektion bedeutet, dass das Kriterium von überdurchschnittlicher Wichtigkeit für die Bewertung ist und umgekehrt.

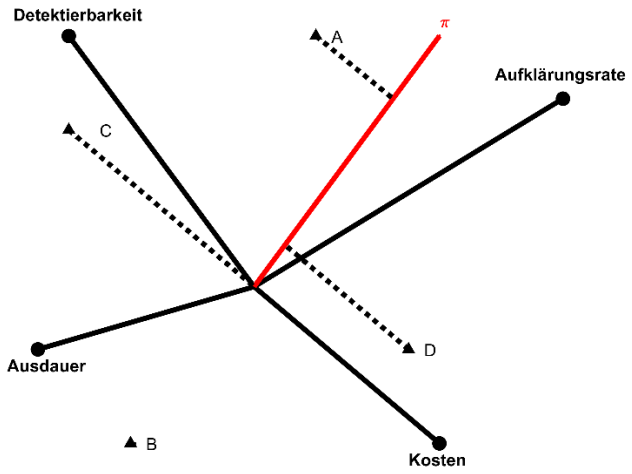


Abbildung 39: GAIA (*Geometrical Analysis for Intersactive Assistance*) Ebene aus der PCA. *Es sind vier Alternativen und vier Kriterien dargestellt, welche mit der PCA auf zwei Dimensionen reduziert wurden. Nach Bildung der orthogonalen Schnittpunkte der Alternativen mit dem Decision Stick lässt sich eine Rangfolge aus dem Abstand von Schnittpunkt und Koordinatenursprung ermitteln.*

Die PCA-Ebene zeigt Abhängigkeiten zwischen den Kriterien untereinander sowie zwischen den Kriterien und den Alternativen. Eine Rangfolge der Alternativen oder deren Potential kann allerdings nicht direkt aus dieser Darstellung abgelesen werden. Eine solche Zusammenfassung der Informationen kann über den sogenannten Entscheidungsstrahl (*Decision Stick*) π bereitgestellt werden. Dieser ist in Abbildung 39 rot hervorgehoben. Er spiegelt die normierte Gewichtungsverteilung der *Elementaren Kriterien* wieder und zeigt in die Richtung der besten Alternative für das zugrundeliegende Zielsystem. Ein Ranking kann aus dem orthogonalen Abstand der Alternativen zu dem *Decision Stick* abgeleitet werden. Dazu werden die Schnittpunkte der orthogonalen Verbindung zwischen Alternativen und *Decision Stick* $[\pi,+\pi]$ betrachtet, wobei die dem Abstand zwischen dem entsprechenden Schnittpunkt und Ursprung des *Decision Sticks* entspricht. In dem Beispiel zeigen die orthogonalen Schnittpunkte, dass Alternative A die beste Lösung für das zugrundeliegende Zielsystem darstellt, gefolgt von Alternative D und C. Alternative B zeigt die schlechteste Eignung von den betrachteten Alternativen, obwohl diese die höchste Ausdauer (Stehzeit) aufweist.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein konzeptueller Ansatz sowie ein eingebettetes Methodenrepertoire für ein DSS zur Bewertung luftgestützter Systeme vorgeschlagen, welcher die Anforderungen aus Kapitel 2.3.2 erfüllt. Dieser Ansatz besteht aus einem *Makro-Konzept* und einem spezifischen – auf die Bewertung luftgestützter Systeme ausgerichteten – *Mikro-Konzept*. Das *Makro-Konzept* beinhaltet Prozesse zur Formulierung der Nutzenabsicht sowie der Definition der betrachteten Luftfahrzeuge. Weiterhin enthält es einen Prozess, welcher Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie nutzt, um ein Bewertungsergebnis aus konfliktären Zielsystemen herzuleiten und darauf aufbauend weitere Untersuchungen wie Sensitivitätsanalysen oder Optimierungen der Kriterienausprägungen[86] durchzuführen. Das *Mikro-Konzept* beinhaltet den methodischen Baukasten, um ausgehend von der Nutzenabsicht die explizite Datenbasis bestehend aus deskriptiven Kriterien und entscheidungsrelevanten Parametern für ein vollständiges Zielsystem abzuleiten. Darunter zählen neben den Kriterien selbst die Präferenzen des ET. Zur Strukturierung der Vielzahl an Daten und zur Ermittlung bzw. Festlegung weiterer Relationen wurde das *House of Metrics* entwickelt, welches aus der Fusionierung der Anforderungen für das *Mikro-Konzept* und der betrachteten Lösungen abgeleitet wurde. Es ermöglicht eine hierarchische, strukturierte Ablage der Daten und berücksichtigt wichtige Relationen wie Wechselwirkungen oder Abhängigkeiten für weitere Berechnungen. Diese Wechselwirkungen können zu mehrdeutigen Zielfunktionen führen, welche mit *Pareto Fronten* berücksichtigt werden können. Allgemein ermöglicht der entwickelte Ansatz des *HoM* eine nachvollziehbare Ableitung der entscheidungsrelevanten Parameter bei gleichzeitig strukturierter Datenablage. Das *HoM* dient als Datenbasis für den Bewertungsprozess und kann als A-Priori Wissen dem Entscheidungsprozess beigestellt werden.

Ausgehend von dem *HoM* wird eine Quantifizierung der Kriterien vorgenommen und deren Ausprägung mit entsprechenden Berechnungsmodulen bestimmt. Zur objektiven Ermittlung einer Bewertung wurde die Methode *Promethee* als geeignetste Methode identifiziert, um ein transparentes, reproduzierbares und präferenzabhängiges Ergebnis zu ermitteln. Daraus ergeben sich folgende Anwendungen (*Use Cases*) für den vorgestellten Ansatz eines DSS:

- Missionsorientierte Bewertung luftgestützter Systeme:
  Ableitung eines nutzerorientierten Bewertungsergebnisses von Luftfahrzeugen zur Erfüllung einer definierten Nutzenabsicht. Als Datenbasis wird eine modifizierte Methode namens *House of Metrics* entwickelt, welche alle entscheidungsrelevanten Parameter für die Ergebnissynthese mit Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie bereitstellt. Das Ergebnis wird auf den einzelnen Detailebenen der Kriterienhierarchie ermittelt und mit entsprechenden Darstellungsformen aufbereitet.

[86] Der Algorithmus zur Berechnung optimaler Kriterienausprägungen und damit Anforderungen für den Entwurfsprozess wird bei der Implementierung in Kapitel 5.4.3 behandelt.

- Analyse der Bewertungsergebnisse:
  Da die Abbildung der subjektiven Einflüsse der Präferenzen sowie die Ermittlung der Ausprägungen mit Unsicherheiten verbunden sind, kann durch die Anwendung von lokalen und globalen Sensitivitätsanalysen die Auswirkung von Unsicherheiten auf das Bewertungsergebnis ermittelt und damit dessen Robustheit analysiert werden.
- Ableitung optimaler Systemparameter:
  Mit dem Ansatz kann eine ganzheitliche Optimierung vorgenommen werden, so dass nicht jedes Kriterium verbessert werden muss, um eine dominante Alternative zu erhalten. Vielmehr sind einzelne, ausschlaggebende Fähigkeiten zu verbessern, um das Erfüllungspotential zu steigern. Diese notwendigen Verbesserungen können quantifiziert werden, so dass damit mögliche Modifikationen für das System oder Spezifikationen für den Entwurfsprozess abgeleitet werden können.

Die Transformation aller Kriterienausprägungen in „*Zahlenwerte und deren Verrechnung scheint auf den ersten Blick sehr vorteilhaft, denn damit wird der Vergleich*“ verschiedener Alternativen erheblich vereinfacht (Müller-Herbers 2007). Doch genau mit dieser Verrechnung gehen zwei Gefahren einher: Alternativen mit ähnlich günstigen oder ungünstigen Gesamtpotentialen können die betrachteten Sub-Kriterien in unterschiedlicher Weise erfüllen. So können Alternativen Stärken und Schwächen in einzelnen Teilbereichen aufweisen, welche bei der Betrachtung des Gesamtergebnisses nicht sichtbar sind. Damit ist diese Information durch die transformierten Zwischenergebnisse nicht mehr nachvollziehbar. Aus diesem Grund ist bei der Implementierung des Ansatzes besonderes Augenmerk auf die nachvollziehbare Ergebnisdarstellung in den unterschiedlichen Ebenen zu legen. Dabei sind auch Nutzen/Kosten Relationen zu betrachten, welche im folgenden Kapitel bei der Implementierung des in diesem Kapitel vorgestellten methodischen Ansatzes für ein DSS behandelt werden.

5. Umsetzung des Entscheidungsunterstützungssystems *DESFACE*

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der bisher theoretisch beschriebenen Konzeption zu einem Entscheidungsunterstützungssystem ***DESFACE*** (***DE**cision **S**upport **F**ramework for **A**ir**C**raft **E**valuation*) für die Bewertung luftgestützter Plattformen erläutert. Dazu werden die funktionalen Module und deren Schnittstellen untereinander erklärt. Deren algorithmische und softwaretechnische Implementierung sind vorwiegend im Anhang erläutert. Im Folgenden soll das Prozessmodell aus Kapitel 4.1 als konzeptionelles Vorgehensmodell aufgegriffen und dessen modulare Umsetzung beschrieben werden. Die Gliederung dieses Kapitel lehnt sich dabei an Kapitel 4 an.

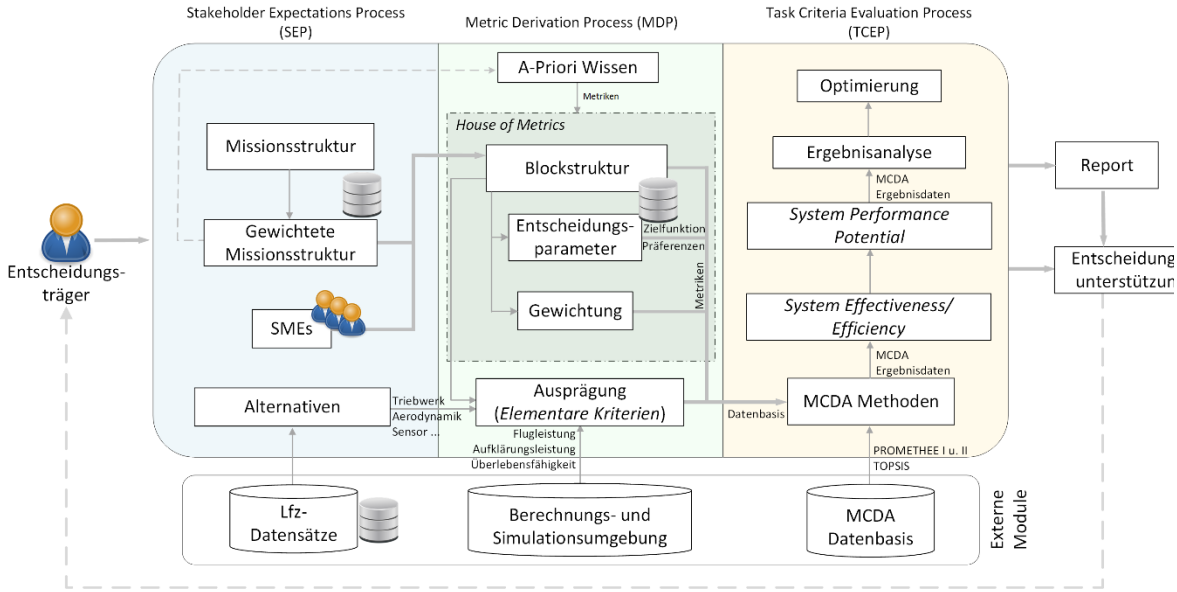


Abbildung 40: *DESFACE* Module des implementierten Konzeptes. *Die farblichen Bereiche markieren die einzelnen Prozesse aus dem Prozessmodel (Makro-Konzept). Mit den entsprechenden Modulen wurde das System zur Entscheidungsunterstützung realisiert. Dazu wurde ein objektorientiertes Klassenmodell in Matlab mit Java Applikationen implementiert. Als Schnittstelle zwischen ET und Software wurde eine grafische Oberfläche realisiert.*

5.1 Struktur von *DESFACE*

Abbildung 40 zeigt die einzelnen Module, welche nach den Prozessen des *Makro-Konzeptes* gegliedert sind. Die Darstellung veranschaulicht das funktionale Konzept aus Abbildung 13 sowie die Datenflüsse

zwischen den entsprechenden Modulen der einzelnen Prozesse. In den folgenden Kapiteln sollen die wesentlichen Module als Teileinheiten herausgegriffen und detailliert erläutert werden. Dazu wird zunächst die Auswahl des Nutzenprofils und anschließend die Ableitung der Inhalte des *HoM* inklusive dessen Implementierung behandelt (siehe Kapitel 5.2). Darauf aufbauend werden die externen Module bzw. Datensätze für die Alternativen (Lfz-Datensätze), die Berechnungsmodule sowie die MCDA- Methoden betrachtet, um zunächst die Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* und weiter ein Bewertungsergebnis zu bestimmen (siehe Kapitel 5.3). Kapitel 5.4 beschreibt die Formen der Ergebnisdarstellung sowie weitere Analysemöglichkeiten wie bspw. die Ermittlung von Korrelationen und die Möglichkeiten der Optimierung der Ausprägungen. Alle Softwarekomponenten der Module des DSS wurden objektorientiert in *Matlab* unter der Nutzung von *Java* Applikationen implementiert. Als Schnittstelle zwischen Software und dem ET wurde eine grafische Oberfläche entwickelt, um die Anwendungssoftware mittels Symbolen und Steuerelementen (*Widgets*) bedienbar zu machen. Das Klassendiagramm in Abbildung 41 zeigt die Generalisierungen und qualitativ die zugehörigen Kompositionen der implementierten Applikation.

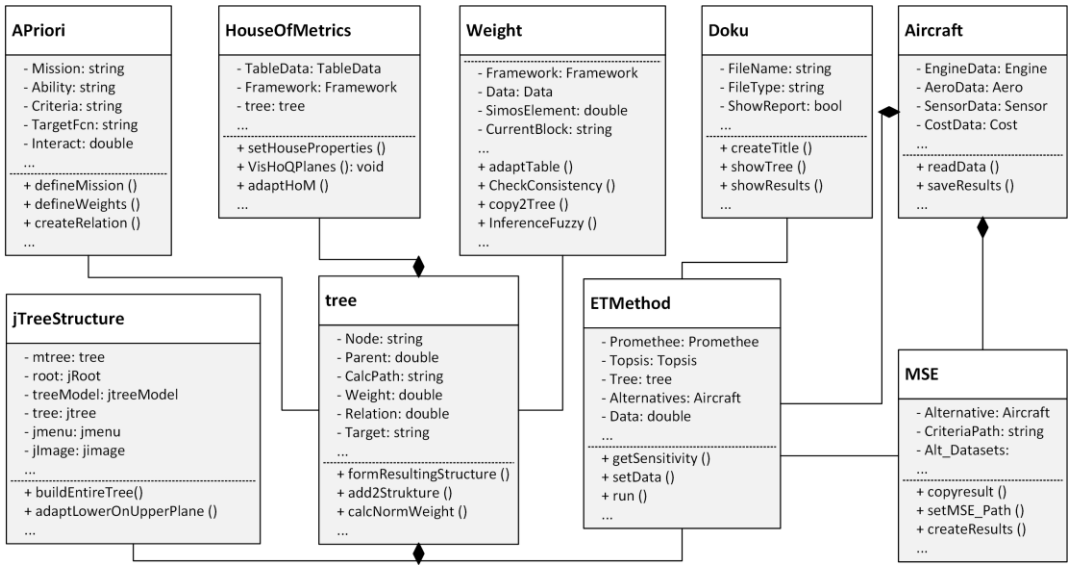


Abbildung 41: Qualitatives Klassendiagramm des Prozessmodels von *DESFACE*. *Darstellung der übergeordneten Module der Klassenstruktur. Die Klassen werden weiter vererbt und dienen dabei als Quelltypen. Daher sind nur die Elternklassen dargestellt. Die entsprechende detaillierte Struktur wird im Anhang genauer beschrieben.*

Zur Beschreibung der Kriterienhierarchie wurde die *tree* Klasse implementiert, aus welcher sich die einzelnen Instanzen der Blockstruktur (Mission, Fähigkeit, Kriterien) ableiten. Diese Klasse beinhaltet die hierarchische Gliederung sowie alle entscheidungsrelevanten Daten der Einträge (Präferenzen, Zielfunktion, Abhängigkeiten). Die Instanzen dieser Klasse werden direkt auf Basis des *A-Priori* Wissens aufgebaut, welches in der entsprechenden *A-Priori* Klasse hinterlegt wird. Dieses Wissen wird mit Experten (siehe Kapitel 4.2.1.2) ermittelt und der Applikation beigestellt. Zur Ermittlung von Gewichtungen steht eine *Weight* Klasse zur Verfügung, welche sich auf die entsprechenden Einträge der Instanzen der *tree* Klasse bezieht und die ermittelten Gewichtungen an diese übergibt und darin ablegt (Datenbank). Diese Instanzen werden mit der Klasse *jTreeStructure* dargestellt. Alle Daten werden in der Klasse *HouseOfMetrics* gesammelt und als Datenbasis der *ETMethod* Klasse übergeben. Diese bezieht zusätzlich die

berechneten Ausprägungen für die *Elementaren Kriterien* aus der *MSE* Klasse ein. Darin sind die Berechnungsmodule enthalten, welche die Datensätze der betrachteten Luftfahrzeuge aus der *Aircraft* Klasse nutzt. Mit der Klasse *Doku* wird eine Dokumentation des Bewertungsverfahrens erstellt. Im Folgenden werden die einzelnen Module genauer betrachtet und deren Umsetzung erläutert.

Die Startoberfläche der umgesetzten Applikation ist in Abbildung 42 gezeigt. Diese zeigt auf der linken Seite die Auswahltabs, welche die einzelnen Schritte durch den Entscheidungsprozess vorgeben. Die Tabs sind im Einzelnen:

Structure In diesem Tab ist die Blockstruktur (Mission, Fähigkeit, Kriterien) enthalten, welche auf Basis des *A-Priori* Wissens erstellt und durch den ET angepasst werden kann. Dieser kann Einträge hinzufügen oder löschen, Namen ändern, Beschränkungen (*Constraints*) definieren oder Knoten als *Elementare Kriterien* definieren.

Weighting Die Definition der Gewichtungsverteilung findet für jeden Knoten in der Gesamtstruktur statt. Nach (Ruhland 2004) muss die Bestimmung der Gewichte von der Darstellung in der Kriterienhierarchie unabhängig sein, wodurch die Gewichtung in einem separaten Tab durchgeführt wird.

HoM Die Darstellung der Datenbasis findet im *House of Metrics* statt, welches alle entscheidungsrelevanten Parameter bereitstellt. Der ET kann weitere Anpassungen vornehmen, falls dies die Nutzenabsicht erfordert.

Alternatives Auswahl der zu betrachtenden Luftfahrzeuge inklusive deren Anschaffungs- und Lebenszykluskosten und Konfigurationen. Für das Konfigurationsmanagement wurde eine eigene Applikation zur Beladung erstellt.

Quanti Zur Quantifizierung der *Elementaren Kriterien* werden Berechnungsmodule genutzt, welche auf Basis des Szenarios die entsprechenden Ausprägungen für die *Elementaren Kriterien* berechnen und an das DSS übergeben. Diese missionsspezifischen Werte werden in den Datensätzen der Lfz abgespeichert, so dass diese bei Bedarf geladen werden können.

Result Zur nachvollziehbaren Aufbereitung der Bewertungsergebnisse können alle Zwischenergebnisse in detaillierten Darstellungsformen aufgerufen werden. Weiterhin kann eine Überprüfung der Robustheit oder die Ableitung optimaler Ausprägungen durchgeführt werden.

Report Es kann ein Bericht des Entscheidungsprozesses mit dessen Datengrundlage automatisch erstellt werden.

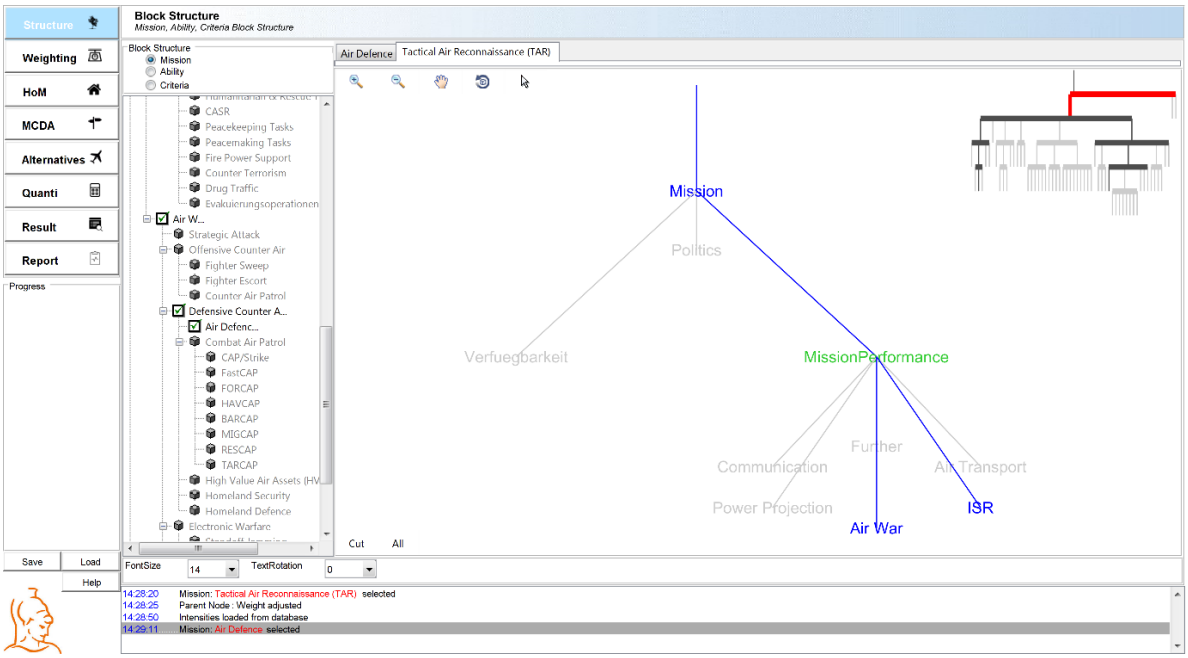


Abbildung 42: Oberfläche von *DESFACE* im Tab *Structure*. *Die blauen Einträge verdeutlichen die ausgewählten Missionen. Dabei wird zur Wahrung der Übersichtlichkeit nur die über- und untergeordnete Ebene des ausgewählten Eintrages dargestellt. Der angewählte Eintrag wird farblich grün hervorgehoben. Die gesamte Struktur mit den ausgewählten Ästen ist in der oberen rechten Ecke dargestellt.*

Neben den Tabs wird die Struktur im ausgewählten Block (*Mission*, *Ability*, *Criteria*) als zweidimensionale Liste und als dreidimensionaler Baum dargestellt. Beide werden synchronisiert, so dass bei der Auswahl eines Eintrages in der Liste der Baum angepasst wird und *vice versa*. In Abbildung 42 wurden zwei Missionen (*Air Defence* und *Tactical Air Reconnaissance*) ausgewählt, deren hinterlegte Struktur jeweils getrennt voneinander betrachtet werden kann (siehe obere Tabs). Um die Darstellung des Baumes übersichtlich zu gestalten, ist auf der über- und untergeordneten Ebene der entsprechende Elterneintrag sowie die Geschwister- und Kindereinträge zusehen. Der ausgewählte Eintrag wird grün hervorgehoben. Die gesamte Struktur des jeweiligen Blockes ist in der oberen rechten Ecke zu finden. Dabei werden die aktuelle Ebene innerhalb der Struktur sowie die aktivierten Äste farblich hervorgehoben. Bei dem Fähigkeits- und Kriterienblock lassen sich durch einen Rechtsklick auf die Einträge unterschiedliche Aktionen auswählen, bspw. Einträge hinzufügen oder löschen, Namen ändern, Beschränkungen (*Constraints*) definieren oder Knoten als *Elementare Kriterien* setzen. Bei Änderungen an der Struktur wird diese durch ein entsprechendes Icon und eine Rückmeldung bestätigt. Beim Überstreichen der Einträge mit dem Mauszeiger werden die entsprechenden Definitionen und einzelne Verknüpfungen mit den über- bzw. untergeordneten Einträgen bzw. Blöcken angezeigt. Im unteren Bereich wird dem Benutzer ein Feedback in Form einer Historie gegeben, welche Aktionen durchgeführt wurden.

5.2 Implementierung der Datenbasis

Die notwendigen Daten zur Ermittlung eines Bewertungsergebnisses mit MCDA- Methoden sind die entscheidungsrelevanten Daten aus dem *House of Metrics* sowie die Ausprägungen der entsprechenden *Elementaren Kriterien*. In diesem Kapitel soll die Modellierung der Datenbasis erläutert werden, während sich das nächste Kapitel mit der Implementierung der Berechnungsmodule befasst.

5.2.1 Block Struktur

Zur Repräsentation der Blockstruktur (Missionen, Fähigkeiten, Kriterien, siehe Kapitel 4.2.1.1) wurde die *tree* Klasse erstellt, welche sowohl die entscheidungsrelevanten Einträge des Blockes als auch die Relationen zu dem über- und untergeordneten Block beinhaltet. Die Attribute eines jeden Eintrages sind in Tabelle 12 aufgeführt. Es werden sowohl die Beziehungen innerhalb des Blockes als auch zwischen den Blöcken deklariert. Mit dem Attribut *Parent* wird der entsprechende Elterneintrag vorgegeben, so dass damit bereits die Struktur abgebildet werden kann. Diese wird weiter ergänzt durch die Gewichtung (*Weight* und *NormWeight*) sowie die Relationen (*Relation* und *RelationTo*) zwischen den Einträgen. Gleichzeitig werden damit auch die Relationen zu dem ober- bzw.- untergeordneten Block hinterlegt, so dass bspw. jeder Fähigkeitsbaustein durch eine bestimmte Kriterienstruktur hinterlegt und durch diese repräsentiert wird. Eine exemplarische Darstellung der Beziehungen zwischen den Einträgen innerhalb eines Blockes sowie zu Einträgen in über- bzw. untergeordnete Blöcke ist in Abbildung 43 dargestellt. Es sind zwei hierarchisch aufeinanderfolgende Blöcke zu sehen (bspw. Missionen und Fähigkeiten oder Fähigkeiten und Kriterien), welche entsprechende Einträge (graue Boxen) enthalten. Gewisse Attribute beziehen sich auf die Charakterisierung der Einträge wie *Name, Node, Weight* und *NormWeight*. Andere

Attribute	Definition	Datentyp
Name	Name des Blocks (Mission, Ability, Criteria)	string
Node	Name des Eintrages	string
Parent	Index des Elterneintrages innerhalb des Blockes	int
Weight	Gewichtung des Eintrages	double
NormWeight	Normiertes Gewicht des Eintrages bzgl. Der Geschwister	double
Relation	Index des Eintrages aus dem übergeordneten Block, auf welchen sich der Eintrag bezieht (bspw. zwischen Fähigkeiten und Kriterien)	double []
RelationTo	Name des Blockes, auf welches sich der Eintrag bezieht	double []
RelatedMission	Name der Mission, auf welche sich der Eintrag bezieht	string []
DependencyTo	Index des Eintrages aus dem gleichen Block, mit welchem der Eintrag eine Wechselwirkung hat	double []
DependencyDir	Deklarierung der Wechselwirkung	string []
RequiredNodes	Beschreibt die Abhängigkeit zu einem anderen Eintrag, in diesem Fall ein notwendiges Vorhandensein einer Ausprägung	double []
ReplacedNodes	Beschreibt die Einträge, welche durch die Ausprägung des Eintrages ersetzt werden können	double []

…

Tabelle 12: Ausschnitt der Attribute der Klasse *tree* zur Repräsentation der Blockstruktur. *Die Attribute bilden die Beziehungen zwischen den einzelnen Einträgen der Baumstruktur sowie die Relationen zu über- bzw. untergeordneten Blöcken ab.*

Attribute wie bspw. *RelationTo* und *DependencyTo* werden dazu benutzt, die Beziehungen zwischen den Einträgen abzubilden und damit die hierarchische Struktur zu modellieren.

Da eine Fähigkeit oder ein Kriterium für mehrere Missionen relevant ist bzw. relevant sein kann (bspw. *Flugleistung* oder *Verfügbarkeit*) oder auch mehrere Wechselwirkungen aufweisen kann, werden die entsprechenden Attribute wie bspw. *RelatedMission*, *Weight*, *RelationTo* oder *DependencyTo* mehrdimensional angelegt (*Cell Array*). In identischer Form erfolgt ein Teil der Ablage des *A-Priori* Wissens. Damit wird ausgehend von der Wahl einer Nutzenabsicht die entsprechende Struktur innerhalb der Blöcke automatisch angepasst („*tailoring*"). Im Folgenden soll dieser Aufbau der Wissensbasis und die Anpassung der Struktur anhand der Nutzenabsicht genauer erläutert werden.

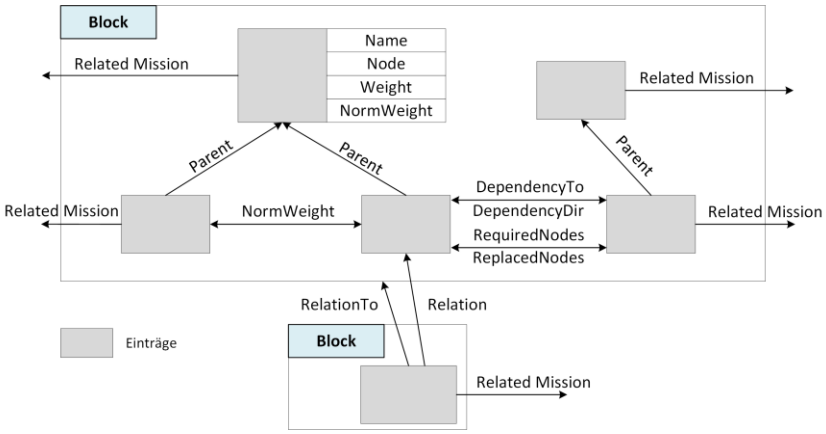


Abbildung 43: Exemplarische Darstellung der Beziehungen zwischen den Einträgen in der *tree* Klasse. *Darstellung der Beziehungen zwischen den Einträgen und die Berücksichtigung durch die Eigenschaften der Klasse.*

5.2.2 Struktur innerhalb des Fähigkeitsblocks

Die Ableitung der Fähigkeiten für luftgestützte Systeme wurde in Zusammenarbeit mit militärischen Organisationen durchgeführt, welche sich mit dem Fähigkeitsmanagement und der Fähigkeitslage der Bundeswehr befassen[87]. Diese stellten 300 *Funktionale Bausteine* zur Verfügung, welche das gesamte Spektrum der Bundeswehr umfassen und für diese Arbeit als Grundlage für den Aufbau des *Fähigkeitsblockes* verwendet wurden. Relevante Bereiche für die Fähigkeitsbewertung von (un)bemannten Luftfahrzeugen wurden selektiert, angepasst und erweitert. Ein Ausschnitt der Struktur innerhalb des *Fähigkeitsblocks* ist in Abbildung 44 dargestellt. Es sind nur die ersten beiden Ebenen der Fähigkeiten

[87] Eine der Hauptaufgaben des *Planungsamtes der Bundeswehr* ist die Sicherstellung der Aufgabenerfüllung durch die Bundeswehr, welche durch das Weißbuch der Bundeswehr vorgegeben werden. Das Weißbuch liefert die Grundlage der Deutschen Sicherheitspolitik, wird vom Bundesministerium der Verteidigung erarbeitet und von der Bundesregierung verabschiedet. Es fasst die Ziele und Rahmenbedingungen der deutschen Sicherheitspolitik zusammen und enthält wichtige Vorgaben für die Bundeswehr (Dörfler-Dierken und Portugall 2010). Daraus werden die *Funktionalen Bausteine* der Bundeswehr abgeleitet, welche sich auf die entsprechenden Aufgaben und Anforderungen an die Bundeswehr (aus dem Weißbuch) ergeben. Diese *Funktionalen Bausteine* werden weiterführend dazu genutzt, um Fähigkeitslücken zu identifizieren und diese zu beheben. Dazu werden Soll-Ist Vergleiche auf Basis dieser definierten Fähigkeiten durchgeführt.

aufgeführt (Fähigkeitsdomänen und -bausteine), für welche weitere Untergliederungen mit entsprechenden Fähigkeitsbausteinen existieren[88].

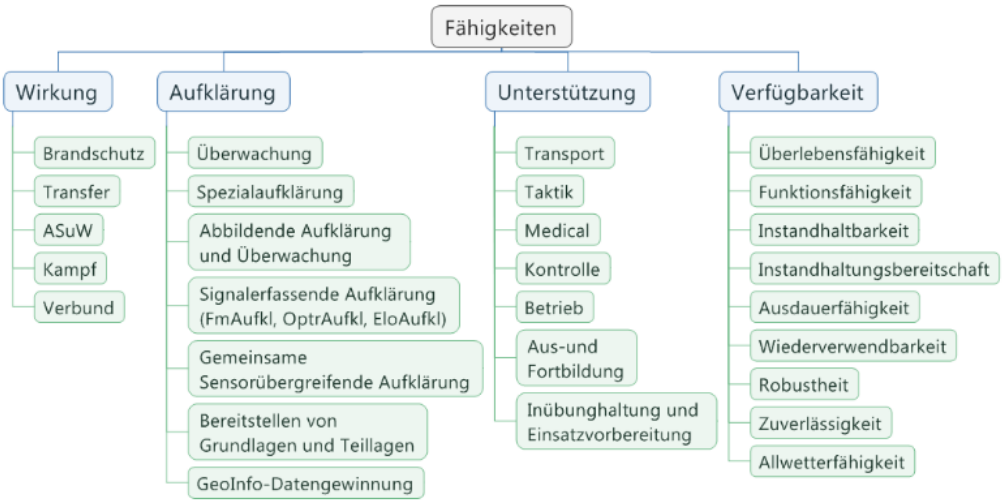


Abbildung 44: Fähigkeitsdomänen und -bausteine des Fähigkeitsblocks. *Die Fähigkeiten wurden aus den Funktionalen Bausteinen der Bundeswehr abgeleitet und für die Nutzung zur Bewertung luftgestützter Systeme erweitert und angepasst. Die erste Ebene enthält Fähigkeitsdomänen, welche weiter in Bausteine dekomponiert werden.*

Nach (Rossow et al. 2014) sind die grundlegenden Fähigkeiten von luftgestützten Systemen in *Transport*, *Aufklärung* und *Überwachung* sowie *Wirkung* bzw. *Bekämpfung* zu unterteilen. Diese sind entsprechend noch weiter dekomponierbar. Die oberste Ebene der Fähigkeiten (*Wirkung*, *Aufklärung*, *Verfügbarkeit* unter *Unterstützung*) werden als *Fähigkeitsdomänen* bezeichnet (blau). Diese stehen mit entsprechenden *Fähigkeitsbausteinen* in Beziehung, welche sich unterhalb der Domänen ansiedeln (grün). Dabei werden ausschließlich systemische, plattformspezifische Fähigkeiten inkl. der notwendigen Ressourcen berücksichtigt, so dass keine personellen Faktoren (psychologische Faktoren der Besatzung wie bspw. Resilienz) betrachtet werden. Der Fähigkeitsblock besteht insgesamt aus vier Ebenen, wobei die Fähigkeiten soweit zu dekomponieren sind, bis sie durch die erste Ebene des *Kriterienblocks* quantifiziert werden können (siehe Kapitel 4.2.1.1).

[88] http://www.planungsamt.bundeswehr.de/portal/a/plgabw/start/abteilungen/abteilung_2/!ut/p/z1/hU67CsIwFP0Wh665l1atusXFB0WECrZZJG1jqsSkpLHx8404CYpnO08OMCiAaT5cJHcXo7kKvGTT03KWHbJ4HseHzRKRrnZxkqbrZDVGOP4LsGDjD1CEvBFQho3098YEcmDArnzgD9IZ65RwhNevh1C2XDdK7E1N38IWmFSmelnukpmEpgVZ2GFJXcb5Na5rl9EGKH3nkhjpBKkERF-a7Smd1B8BKG7FR6TiRoyOnoCNZ4TvQ!!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/#Z7_B8LTL2922TIB00AGN2377H3G45, zuletzt besucht am 02.09.2018

5.2.3 Auswahl der Mission und Anpassen der Kriterienstruktur

Für die Auswahl des Nutzenprofils wird dem ET eine umfangreiche Sammlung an zivilen und militärischen Missionen für luftgestützte Systeme zur Verfügung gestellt. Eine Aufstellung der auswählbaren Missionsstruktur ist im Anhang dargestellt. Nach der Auswahl der Mission wird ein resultierender Strukturbaum über alle Blöcke aufgebaut, welcher die entsprechenden Fähigkeiten und Kriterien aus den Blöcken enthält und auf Basis der hinterlegten Beziehungen miteinander verknüpft. So entsteht eine resultierende Hierarchie an Einträgen über alle Blöcke.

Das Flussdiagramm zur Auswahl einer Mission und der nachfolgenden Schritte ist in Abbildung 45 dargestellt. Als Daten sind die drei Blöcke inklusive deren Einträge vorhanden. Aus dem *Missionsblock* erfolgt die Auswahl einer Nutzenabsicht durch den ET. Anschließend erfolgt eine Überprüfung der *A-Priori*-Wissensbasis bzgl. der abgelegten Daten zu dieser Nutzenabsicht. Ist kein Wissen bzgl. der ausgewählten Nutzenabsicht vorhanden, ist dieses manuell durch den ET mittels der Definition der Metriken bereitzustellen. Zur Ableitung der entscheidungsrelevanten Parameter (Gewichtung, Wertfunktion) stellt die Software geeignete Methoden bereit, welche bereits in Kapitel 4.2.2 erläutert wurden. Enthält die *A-Priori* Wissensbasis das entsprechende Wissen, wird dieses genutzt, um ausgehend von der Nutzerauswahl eine Ableitung der Fähigkeits- und Kriterienstruktur vorzunehmen. Die entsprechenden Einträge werden über die Attribute der *tree* Klasse miteinander in Beziehung gebracht und damit die hierarchischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen berücksichtigt. Anschließend erfolgen die Zuordnung der Präferenzen und die Ermittlung der *Elementaren Kriterien*. Der ET kann ebenfalls subjektive Anpassungen der Wissensbasis vornehmen, falls das Bewertungsproblem dies erfordert. Zur Aufrechterhaltung der Nachvollziehbarkeit werden diese Anpassungen dokumentiert. Abschließend wird die finale Metrikstruktur an das *HoM* übergeben und dient als Grundlage für die Bewertung.

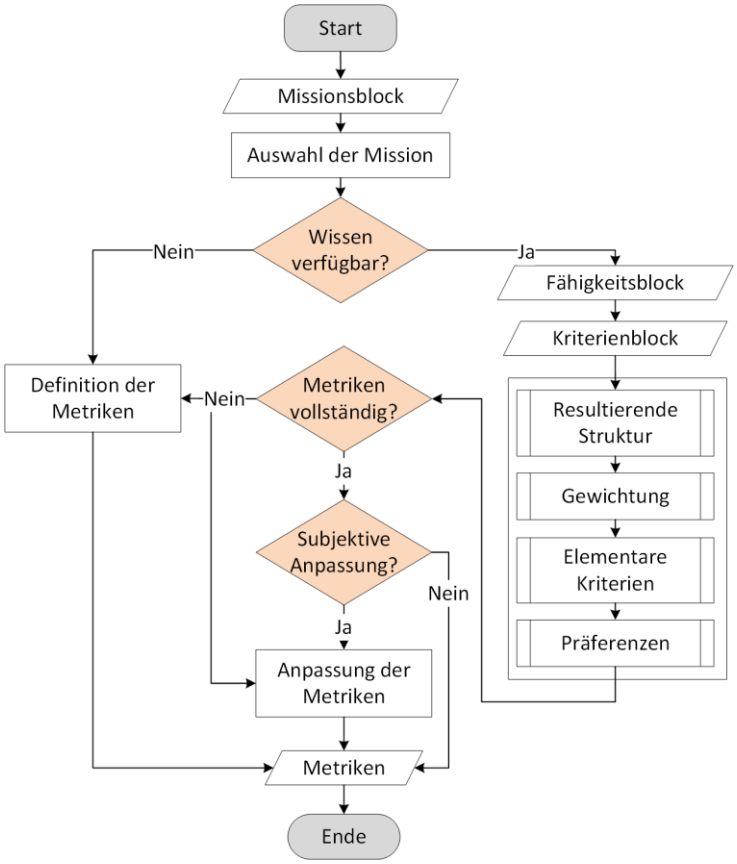


Abbildung 45: Flussdiagramm zur Auswahl einer Nutzenabsicht und der nachfolgenden Anpassung der Metriken. *Falls kein A-Priori Wissen verfügbar ist, muss die Datenbasis vom ET methodisch aufgebaut werden.*

Abbildung 46 zeigt die Einträge des Fähigkeitsblockes für die ausgewählte Mission *Air Defence*. Diese Fähigkeiten werden in der dreidimensionalen Baumdarstellung blau hervorgehoben, während die übrigen Einträge grau in den Hintergrund gerückt werden. Die ausgewählten Äste sind ebenfalls blau markiert und in der Baumübersicht (rechts oben) schwarz hervorgehoben. In der unteren Ecke ist für die ausgewählte Fähigkeit *Aufklärung* gezeigt, dass diese zu dem Eintrag des übergeordneten Blockes (Mission) *Air Defence* gehört.

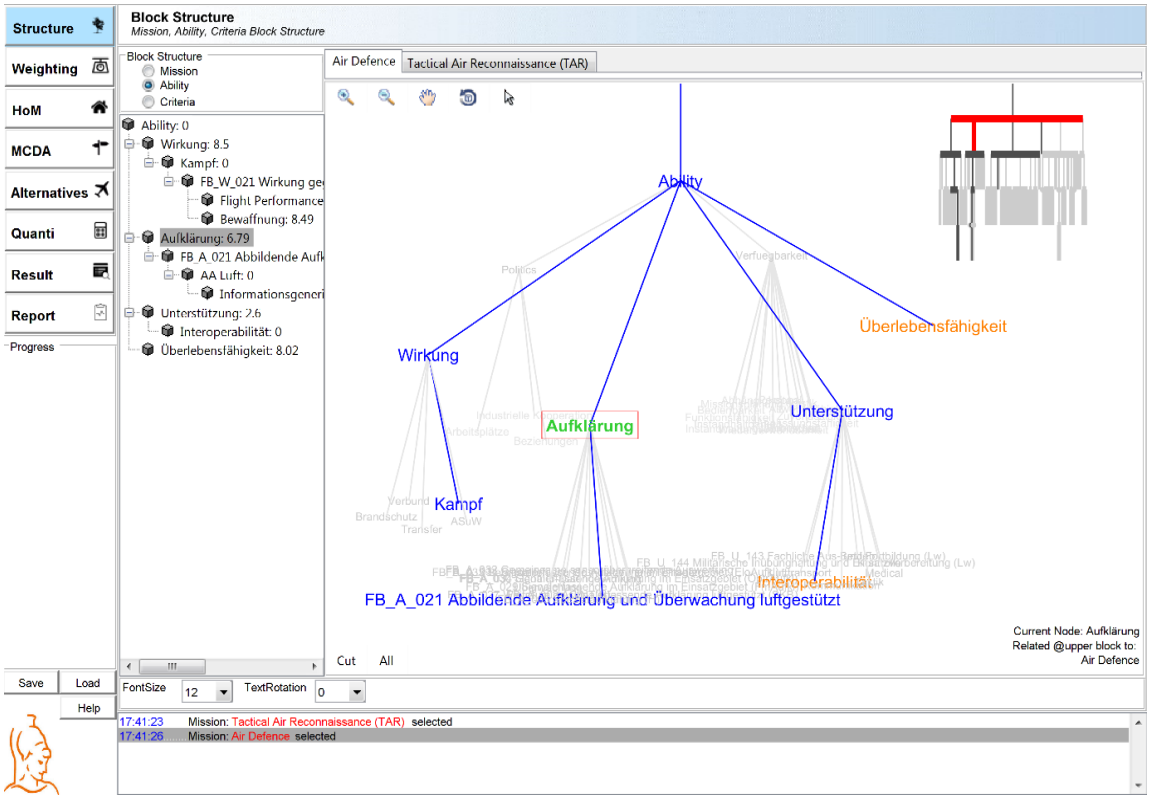


Abbildung 46: Darstellung der implementierten Blockstruktur (*Fähigkeitsblock*) in der Software. *Die roten Einträge zeigen, dass keine weitere Dekomposition existiert. Der angewählte Eintrag wird farblich grün hervorgehoben. Beim Überdecken mit der Maus werden die Definition und Abhängigkeiten des entsprechenden Eintrages mit anderen Einträgen dargestellt.*

5.2.4 Bestimmung der Gewichtung

Die Gewichtung der Kriterien soll ein missionsorientiertes Zielsystem sowie die subjektiven Wertvorstellungen des ET widerspiegeln. In Kapitel 4.2.2.1 wurden dazu die bestehenden Methoden gesichtet und im Rahmen einer Methodenauswahl ein entsprechender Ansatz in Anlehnung an die natürliche Sprache des ET ausgewählt. Dieser basiert auf der Berücksichtigung unscharfer Zahlen bei einem Paarvergleich von Kriterien, so dass der ET seine Präferenzen mit linguistischen Variablen ausdrücken kann (siehe Anhang). Um eine missionsorientierte Gewichtungsverteilung sicherzustellen, sind auf jeder Ebene der Blöcke die entsprechenden Kriterien gleichzeitig zu betrachten. Die Implementierung des *Fuzzy-AHP* enthält neben der Nutzeroberfläche die interne Verrechnung der linguistischen Variablen (*Defuzzifizierung*) sowie eine Konsistenzprüfung. Die entsprechende Oberfläche ist in Abbildung 47 dargestellt.

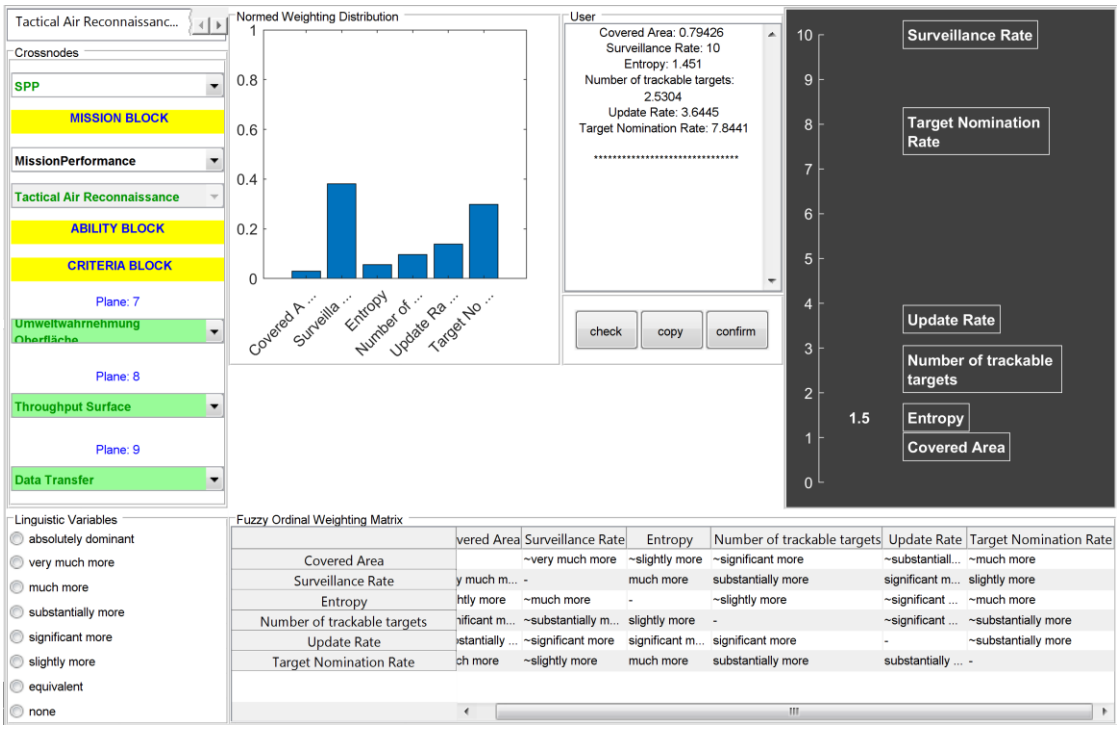


Abbildung 47: Oberfläche zur Ermittlung der Gewichtungsverteilung im Tab *Weighting*. *Grafische Oberfläche zur Ermittlung der Gewichtungen mit der Fuzzy AHP Methode. Die Gewichtungen werden – falls verfügbar – durch die Wissensbasis bereitgestellt und können adaptiert werden.*

Die oberen Tabs zeigen die betrachteten Missionen, für welche jeweils eine Gewichtungsverteilung der Kriterienstruktur durchzuführen ist. In der Darstellung sind beide Missionen aktiv (*Air Defence* und *Tactical Air Reconnaissance*) und die Auswahl findet aktuell für die *Tactical Air Reconnaissance* (TAR) Mission statt. Für diese Mission werden alle Kotenpunkte auf den Ebenen innerhalb des deskriptiven Baumes aufgeführt, für welche eine Gewichtung durchzuführen ist. Nach (Ruhland 2004) muss die Bestimmung der Gewichte von der Darstellung in der Kriterienhierarchie unabhängig sein, wodurch die einzelnen Knotenpunkte in einem *DropDown*-Menü ausgewählt werden können (links), allerdings nicht in ihrer Hierarchie dargestellt werden. Für Einträge ohne Geschwister bedarf es keiner Gewichtung, so dass diese grau unterlegt und nicht anwählbar sind (in der Abbildung nicht dargestellt). Nach Auswahl eines Eintrages werden die entsprechend zu gewichtenden Kind-Kriterien des Eintrages in der Gewichtungsmatrix aufgeführt (mittig unten, *Fuzzy Ordinal Weighting Matrix*). Der ET bzw. Experte kann durch Auswahl einer Zelle der Matrix den entsprechenden Paarvergleich mit den linguistischen Variablen (unten links, *Linguistic Variables*) durchführen. Der inverse Paarvergleich mit den reziproken Zugehörigkeitsfunktionen wird in der entsprechenden diagonalen Zelle hinterlegt (siehe Erläuterung im Anhang). Nachdem alle Paarvergleiche für den gewählten Elterneintrag durchgeführt wurden, werden die Gewichtungen auf deren Konsistenz geprüft und die skalare sowie nominale Gewichtung (*Normed Weighting Distribution*) ermittelt bzw. angezeigt (mittig oben, *User Panel*). Es zeigt sich, dass der Konsistenzindex (User Panel, CI = 0,093) auf eine konsistente Gewichtungsverteilung hindeutet (siehe Anhang). Der ET hat nun die Möglichkeit, kleinere Anpassungen der Gewichtungen durch Verschieben (*Drag&Drop*) der Boxen vorzunehmen (rechts). Mit der Bestätigung (*confirm*) wird die Verteilung gesichert und für die Ableitung eines Bewertungsergebnisses berücksichtigt. Die Gewichtungen werden bei

verfügbarer Wissensbasis nach Auswahl des Elterneintrages dargestellt und können bei Bedarf durch den ET adaptiert werden.

Die grünen Hinterlegungen der *DropDown*-Menüs im linken Bereich (*Plane 7-9*) zeigen, dass für alle Knotenpunkte auf der entsprechenden Ebene eine Gewichtungsverteilung entweder bereits bekannt (*A-Priori* Wissen) ist oder definiert wurde. Für den Knotenpunkt *MissionPerformance* zeigt sich, dass in diesem Knoten die Kindkriterien noch zu gewichten sind (*Air Defence* und *Tactical Air Reconnaissance*).

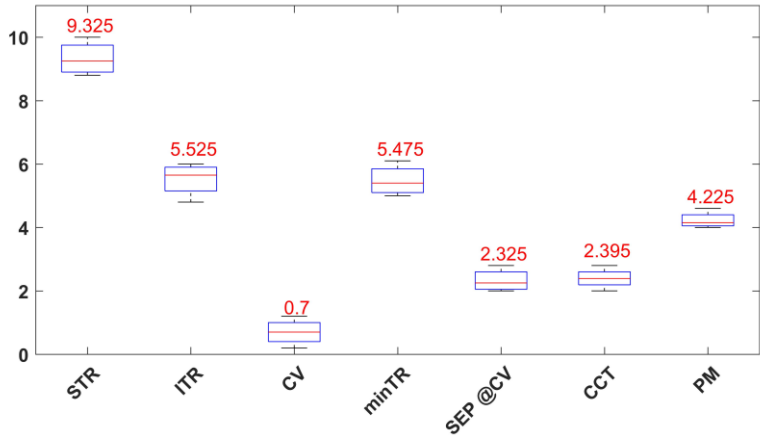


Abbildung 48: Gewichtungsverteilung der Expertenmeinungen im Box-Plot. *Die Grafik zeigt die Abweichungen der Expertenmeinung (Piloten) für die Wichtigkeit der Kind-Kriterien der Kurvenflugleistung. Die blauen Kästen zeigen die Streuung und die roten Werte den resultierenden Durchschnitt.*

Bei der Betrachtung komplexer Problemstellungen ist der ET auf Unterstützung von Fachleuten aus entsprechenden Bereichen angewiesen. Diese unterstützen den ET dahingehend, dass missionsorientierte Gewichtungen – welche nicht die direkten Wertvorstellungen eines ET sondern eine Expertenmeinung repräsentieren – bereitgestellt werden. Dazu kann die Methode zur Gewichtungsfindung von mehreren Experten unabhängig voneinander angewandt und eine entsprechende Gewichtungsverteilung für einen speziellen Bereich der Kriterienstruktur ermittelt werden. Die resultierende Gewichtung ergibt sich aus dem Durchschnitt der Expertenmeinungen, wobei die Größen der Abweichungen berücksichtigt werden sollten. Ein Beispiel für die Ableitung von Gewichtungen durch Experten für die Kriterien der *Kurvenflugleistung* eines Kampfflugzeuges ist in Abbildung 48 dargestellt. Die zu gewichtenden Kriterien sind die *Instationäre Wenderate* (ITR), die *Stationäre Wenderate* (STR), die beste *Kurvenfluggeschwindigkeit* (CV), der *minimale Kurvenradius* (minTR), die *spezifische Überschussleistung* bei der *Instationären Wenderate* (SEP@CV), die *Combat Cycle Time*[89] (CCT) und die *Pointing Margin*[90] (PM). Die blauen Kästen zeigen die Abweichung der individuellen Gewichtungen. Die roten Linien stellen den Mittelwert dar. Daraus ergeben sich die durchschnittlichen Gewichtungen, welche zu dem *A-Priori* Wissen hinzugefügt werden können. Entsprechend sind weitere Gewichtungen für die Blockstruktur auf allen Ebenen zu ermitteln, um eine missionsorientierte Wissensbasis aufzubauen. Das methodische Vorgehen dazu wurde in dieser Arbeit entwickelt sowie implementiert und für ausgewählte Bereiche umgesetzt.

[89] Nähere Informationen zur CCT sind bei (COX und Downing 1992; Ryan und Downing 1995) zu finden
[90] Siehe (Tamrat 1988)

5.2.5 Wertfunktionen

Neben den Gewichtungen sind ebenfalls die Vorzugswerte durch Wertfunktionen (siehe Abbildung 20, Kapitel 4.2.2.2) zu formulieren, welche sich je nach genutzter MCDA- Methode unterscheiden. So nutzt bspw. die *Nutzwertanalyse* sogenannte Nutzenfunktionen, welche sich direkt auf die Ausprägung der Kriterien beziehen. *Promethee* ist auf Präferenzfunktionen angewiesen, welche sich auf die paarweise Differenz der Kriterienausprägung beziehen. Im Rahmen der Methodensichtung aus Kapitel 4.3.2.4 wurde *Promethee* als zweckmäßigster Ansatz für die Bewertung von Luftfahrzeugen identifiziert, weshalb im Folgenden auch nur die Implementierung der Präferenzfunktionen erläutert wird. Weitere Methoden wie bspw. *Topsis* oder die *Nutzwertanalyse* wurden ebenfalls berücksichtigt und sind zur Überprüfung der Ergebnisse von *Promethee* vorgesehen. Dabei werden für die *Nutzwertanalyse* sogenannte Nutzenfunktionen verwendet. Diese sollen allerdings an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden.

Für den charakteristischen paarweisen Vergleich der Alternativen hinsichtlich der einzelnen Kriterien werden unterschiedlichste Präferenzfunktionen genutzt. Mit den klassischen Funktionen können die meisten Verläufe der Präferenzen abgebildet werden. Diese Funktionen wurden implementiert und können bspw. bei (Podvezko und Podviezko 2010) nachgeschlagen werden.

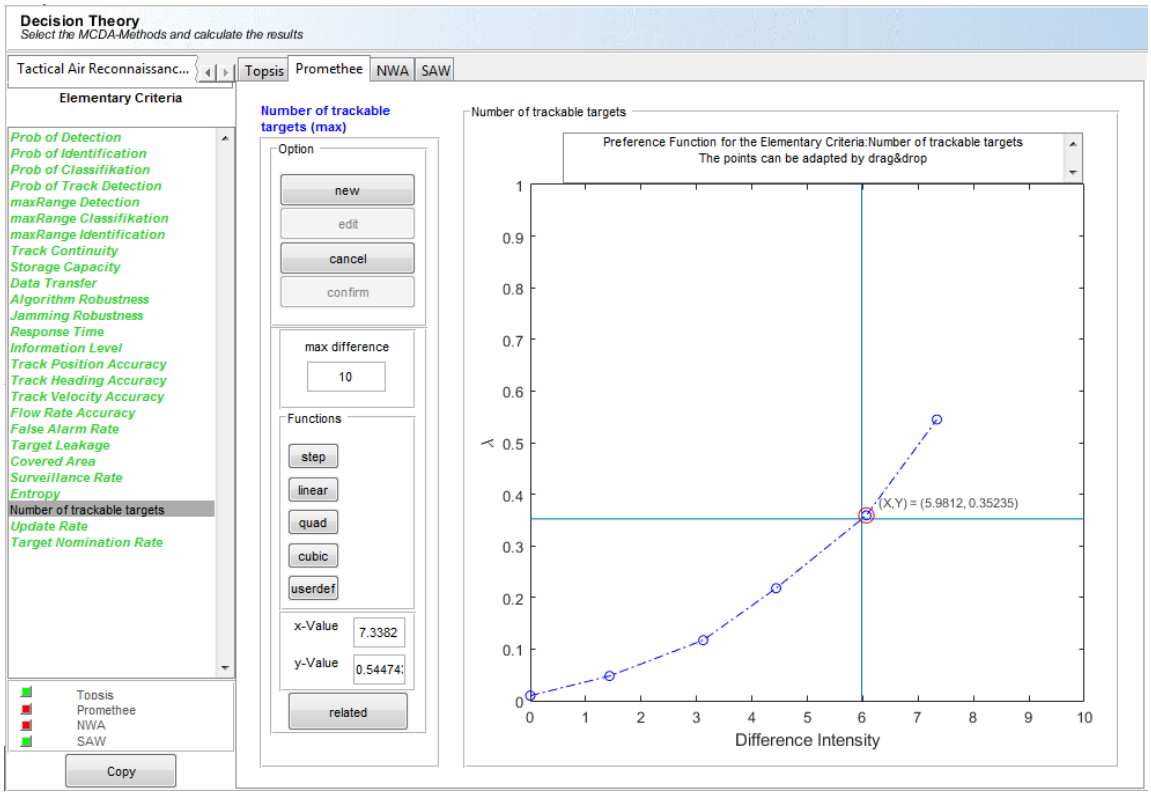


Abbildung 49: *MCDA* Tab zur Definition der Präferenzen. *Dargestellt ist die Definition der Präferenzfunktion für die ET-Methode Promethee in einem benutzerdefinierten Verlauf. Die Funktion wird für das EK „Number of trackable targets" definiert.*

Abbildung 49 zeigt die Oberfläche für die Definition der Präferenzen in dem Tab *MCDA*. In der linken Liste sind alle *Elementaren Kriterien* (EK) für die betrachtete Mission (*Tactical Air Reconnaissance*) zu finden. Die Mission kann in den oberen Tabs umgeschaltet werden. Die grüne Schriftfarbe zeigt, dass für

diese EK bereits Präferenzfunktionen definiert wurden. Andernfalls wurde noch keine Funktion hinterlegt (bspw. *Number of trackable targets*). Mit den oberen Tabs neben den Missionen können die Methoden der Entscheidungstheorie ausgewählt werden. Für jede dieser Methoden sind die Wertfunktionen in unterschiedlicher Art und Weise zu definieren. *Topsis* und *SAW* benötigen Maximum- und Minimumwerte, die *NWA* Nutzenfunktionen und *Promethee* Präferenzfunktionen. Hinter jedem dieser Tabs ist ein entsprechendes Panel für die Definition dieser Daten hinterlegt. Unter der Liste der EK sind die einzelnen ET-Methoden noch einmal aufgeführt. Für das betrachtete EK (*Number of trackable targets*) zeigt sich, dass für *NWA* und *Promethee* keine Funktion gefunden wurde. Als Tab der ET-Methoden ist *Promethee* ausgewählt. Der ET hat nun die Möglichkeit, entweder klassische Funktionsverläufe (*Functions*) auszuwählen (Podvezko und Podviezko 2010) oder benutzerdefinierte Verläufe zu erstellen. Letzteres bietet die Möglichkeit, einen angepassten *Spline* zu hinterlegen und damit detaillierte Funktionen zu erstellen (siehe Abbildung 49). Auf der Abszisse der Koordinatensysteme ist die Differenz zwischen den Ausprägungen zweier Alternativen für das Kriterium aufgetragen[91]. Auf der Ordinate lässt sich der Präferenzwert ermitteln, welcher weiterführend zur Berechnung der Outranking-Relationen (siehe Kapitel 4.3.2.3) genutzt wird.

Mit den Buttons können die Funktionen bestätigt (*confirm*), verworfen (*cancel*), editiert (*edit*) oder neu aufgebaut (*new*) werden. Mit dem Button *related* wird direkt eine lineare Präferenz gesetzt, wobei die maximale Differenz aus der minimalen und maximalen Ausprägung der betrachteten Alternativen berechnet wird. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn der Schwellwert für die maximale Differenz nicht genau definiert werden kann. Mit *copy* werden die Funktionen in die Klassenstruktur (siehe Anhang) übernommen und an die Datenbasis übergeben.

5.2.6 *House of Metrics*: Aufbau der Datenbasis

Zur übersichtlichen Darstellung der entscheidungsrelevanten Parameter sowie zur Formulierung von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Einträgen wurde das *HoM* zur Strukturierung der Datenbasis entwickelt. Die implementierte Oberfläche ist in Abbildung 50 zu sehen. Der ET befindet sich dabei in dem Tab *HoM*.

Die verschiedenen Ebenen der resultierenden Struktur auf Basis der gewählten Nutzenabsicht lassen sich in der oberen linken Ecke sehen. Durch Anwählen des Hauses auf der entsprechenden Ebene werden die zugehörigen Daten dargestellt. Die einzelnen Bereiche des Hauses wurden über Tabellen realisiert, wobei der Raum des Hauses durch die mittlere Tabelle repräsentiert wird. Die dreieckige Struktur des *Daches*, des *Vorgartens* und des *Kellers* wurden über quadratische Tabellen angenähert, in denen jeweils nur eine Tabellenhälfte editierbar ist. Die gegenüberliegenden Zellen (Zeilen und Spalten vertauscht) wurden mit einem Symbol (<!>) besetzt, welches suggeriert, dass keine Bearbeitung durchzuführen ist.

---

[91] Diese kann entweder die Differenz aus maximaler und minimaler Ausprägung der betrachteten Alternativen sein oder aber als globaler Wert über mehrere Luftfahrzeuge gebildet werden. Damit wird deutlich, dass das Bewertungsergebnis eine zeitlich begrenzte Gültigkeit besitzt und bei Technologiesprüngen durchaus eine erneute Bewertung mit ggf. angepassten Schwellwerten durchzuführen ist.

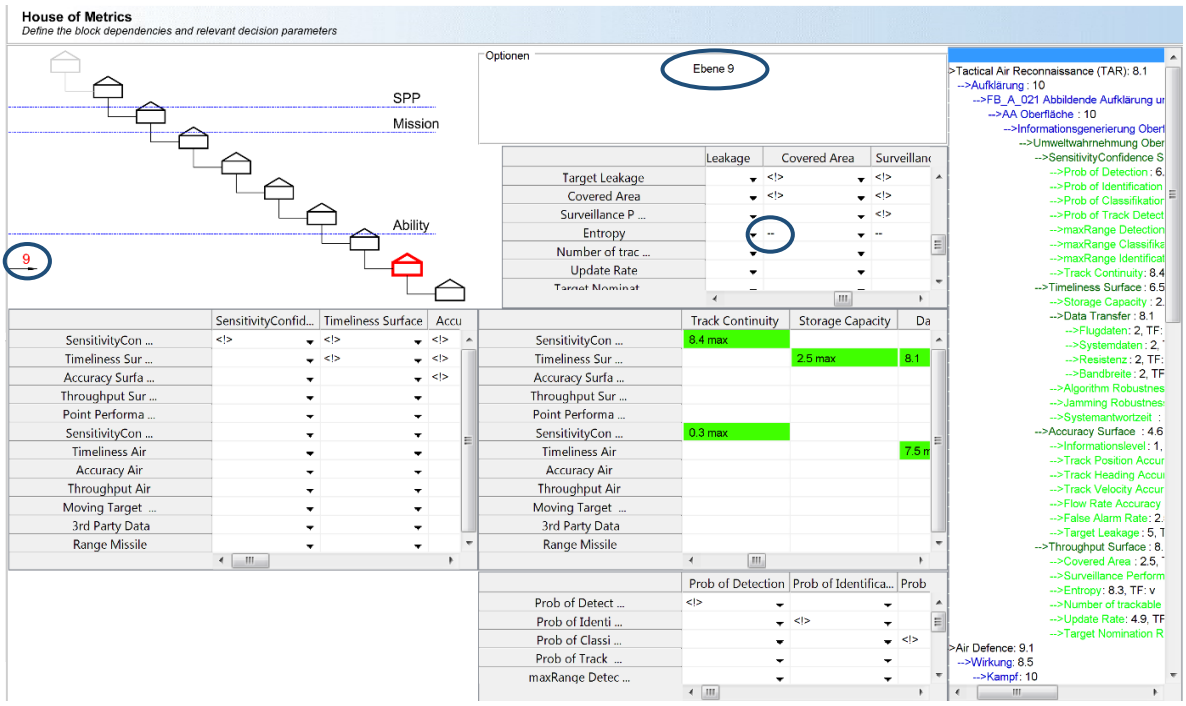


Abbildung 50: Oberfläche des *House of Metrics*. *Durch Anwählen des Hauses in der oberen linken Ecke können die Daten der entsprechenden Ebene dargestellt und editiert werden.*

Die vollständige Formulierung der Wertvorstellungen (Gewichtung und Präferenzen) wird durch eine grün hervorgehobene Zelle für die entsprechenden Eltern-Kind Einträge verdeutlicht. In den Zellen sind die Gewichtungen sowie bei den *Elementaren Kriterien* die entsprechenden Zielfunktionen des Eltern-Kind-Eintrages hinterlegt. In Abbildung 50 zeigt sich, dass die Kriterien zu maximieren sind (max) und dass alle Parameter für die dargestellten Kriterien hinterlegt wurden. Die Tabellen zeigen nur einen Ausschnitt der Datenbasis auf der Ebene 9 der Struktur (siehe Einkreisung), was durch den Schieberegler (Slider) in Zeilen- und Spaltenrichtung verdeutlicht wird.

In der oberen Tabelle (Dach) zeigt sich eine negative Korrelation zwischen der Entropie (*Entropy*) und der aufgeklärten Fläche (*Covered Area*). Diese Korrelation (siehe Einkreisung) beschreibt, dass sich beide Kriterien *stark negativ* (siehe Kapitel 4.2.3.7.2) beeinflussen und direkt voneinander abhängig sind. Bei der Verbesserung des einen Kriteriums wird das andere zwangläufig schlechter. Dieser Umstand wird genauer in Kapitel 5.3.2 beschrieben. In der unteren Tabelle (Keller) können Abhängigkeiten eingetragen werden. Es zeigt sich, dass in diesem Ausschnitt der Darstellung auf der Ebene keine Abhängigkeiten formuliert wurden. Eine solche ist allerdings in Abbildung 51 dargestellt. Die Kriterien *Detektierbarkeit*, *Trefferanfälligkeit* und *Verwundbarkeit* stehen in direkter Abhängigkeit zueinander. Diese wird über ein Ersetzen (replace, *repl*) ausgedrückt, was bedeutet, dass die *Detektierbarkeit* die *Trefferanfälligkeit* und

Verwundbarkeit bedingt. Ist ein Lfz nicht detektierbar, kann es nicht getroffen und damit verwundet werden. Diese ersetzende Beziehung wird bei der Berechnung des SPP berücksichtigt. Dabei werden die einzelnen Ausprägungen miteinander verrechnet[92].

	Detektierba...	Trefferanfäl...	Verwundba...	
Kampf				<!>
Interoperabili ...				
Detektierbarke ...	<!>	repl	repl	
Trefferanfälli ...		<!>	repl	
Verwundbarkeit			<!>	

Abbildung 51: Abhängigkeiten innerhalb des Kellers des HoM. *Die Detektierbarkeit kann die Trefferanfälligkeit und Verwundbarkeit ersetzen. Ist ein Lfz nicht detektierbar, kann es nicht getroffen oder verwundet werden. Ist ein Lfz nicht anfällig gegen Treffer, kann dieses ebenfalls nicht verwundet werden.*

Durch Anwählen der Zellen können die entsprechenden Beziehungen zwischen den Zeilen und Spalten gesetzt werden. Alle editierten Abhängigkeiten und Wechselwirkungen werden automatisch an die entsprechenden Kinder- bzw. Elternkriterien vererbt und in der Datenbasis gespeichert. In der rechten Liste in Abbildung 50 wird die komplette editierte Struktur aufgeführt.

5.3 Ermittlung der Kriterienausprägungen

Bei der Ermittlung der Ausprägung werden aufgrund des Ansatzes einer möglichst objektiven Bewertung Berechnungsmodule (BM) genutzt, welche *DESFACE* modular beigestellt werden. In dieser Arbeit wurden BM exemplarisch für die Fähigkeiten der *Flugleistungen*, der *Umweltwahrnehmung* und der *Überlebensfähigkeit* realisiert. Die Implementierung von BM für weitere Bereiche stellt eine kontinuierliche Aufgabe dar. Im Folgenden soll die Implementierung an diesen ausgewählten Beispielen verdeutlicht werden. Die Klassenstruktur der BM ist dabei im Anhang dargestellt.

5.3.1 Berechnungsmodule für unkorrelierte Kriterienausprägungen

Die Module wurden für unbemannte sowie bemannte Systeme realisiert. Eine Übersicht über die entsprechenden Module ist in Abbildung 52 zu sehen. Die farbliche Aufteilung verdeutlicht die Anwendbarkeit der Module für bemannte (blau) und unbemannte (grün) luftgestützte Systeme. Die Anordnung ist an die entsprechenden übergeordneten Fähigkeiten angelehnt, welche mit den einzelnen Kreisausschnitten verdeutlicht sind. Im Folgenden sollen diese Kreisausschnitte einzeln betrachtet werden.

Überlebensfähigkeit:

Im Bereich der *Überlebensfähigkeit* ist auch die *Verwundbarkeit* aufgeführt, allerdings kann diese aufgrund unzureichender Daten bzgl. der konstruktiven Beschaffenheit der Systeme und damit einer

[92] Eine weitere ersetzende Abhängigkeit lässt sich zwischen der *Speicherfähigkeit* durch *Überragungsfähigkeit* definieren. Eine erforderliche Abhängigkeit (required, *requ*) ist zwischen der *Zielaufklärung* für der *Zielwirkung* abzubilden. Diese Abhängigkeiten werden bei der Bewertung berücksichtigt, so dass ein Lfz mit exzellenter Wirkung im Ziel, jedoch ohne Fähigkeit zur Aufklärung des Zieles, ein Erfüllungspotential von Null bekommt (dies gilt allerdings nur, wenn keine verteilten Fähigkeiten auf unterschiedlichen Plattformen berücksichtigt werden, so dass die Aufklärung von einem anderen System übernommen werden könnte).

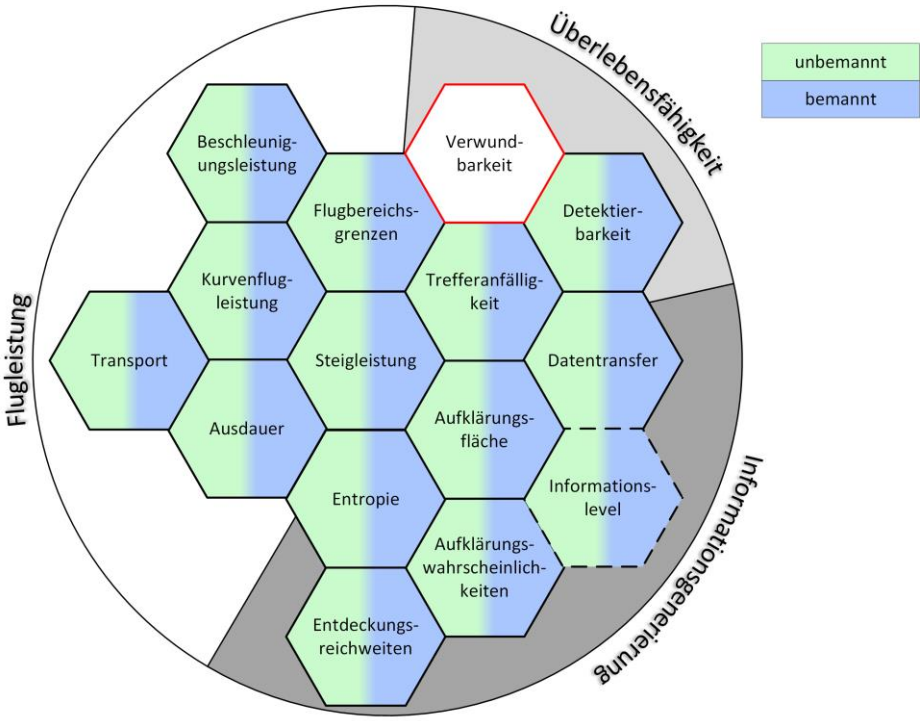


Abbildung 52: Realisierte Module für die Berechnungsumgebung. *Die farbliche Aufteilung verdeutlicht den Anwendungsbereich der Berechnungsmodule für unbemannte oder bemannte Systeme. Es ist zu sehen, dass die meisten Module sowohl für bemannte als auch unbemannte Systeme gleichermaßen eingesetzt werden können.*

unmöglichen Berechnung der Trefferauswirkung nicht quantifiziert werden[93]. Für die auditive *Detektierbarkeit* wurde die Berechnung der Aufklärungswahrscheinlichkeit vom Boden implementiert. Dazu wurde die am Boden ankommende Lautstärke des Lfz in Abhängigkeit von der Motorfrequenz und –lautstärke unter Berücksichtigung der atmosphärischen Dämpfung[94] berechnet und diese mit der menschlichen Hörschwelle verglichen. Der Zusammenhang ist in Abbildung 53 links dargestellt. Mit sinkender Distanz und steigender Frequenz (Motor) erhöht sich die *Detektierbarkeit* des luftgestützten Systems. Das Ergebnis ist dabei zusätzlich abhängig von atmosphärischen Eigenschaften (bspw. Luftfeuchtigkeit) und der menschlichen Hörschwelle.

Die elektromagnetische *Detektierbarkeit* mittels Radar benötigt zusätzliche Informationen wie bspw. die Radarrückstrahlfläche (*radar cross section*, RCS), welche neben der geometrischen Fläche ebenfalls von der Reflektivität der Oberfläche und der Richtcharakteristik abhängt. Für diese Berechnungen gibt es bereits hoch entwickelte und spezialisierte Vorgehen wie bspw. CST Microwave Studio[95], welche auf Basis

[93] Für Verwundbarkeitsanalysen sind detaillierte CAD Modelle notwendig, mit denen die Auswirkung von Treffern auf die Systeme des Lfz abgeschätzt werden.
[94] ISO 9613-1
[95] https://www.cst.com/products/cstmws (zuletzt besucht am 03.09.2018)

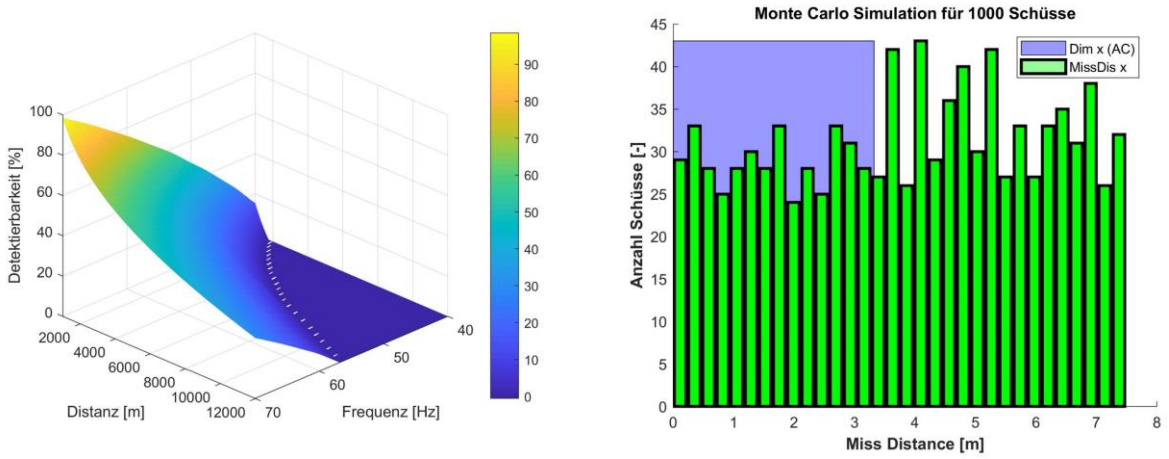


Abbildung 53: Detektierbarkeit und Trefferanfälligkeit eines Luftfahrzeuges. *Die Detektierbarkeit wird durch die Frequenz und Lautstärke des Verbrennungsmotors mit der Hörschwelle des Menschen errechnet. Die Trefferanfälligkeit wird durch eine Monte Carlo Simulation ermittelt.*

eines CAD Models mit der *Shooting Bouncing Ray Method* (SBR)[96] Ergebnisse im quasioptischen Bereich berechnet. Für die *Trefferanfälligkeit* wird ein Kontakteffektor (*Anti-Aircraft Artillery*, AAA) berücksichtigt, welcher entweder das Lfz trifft oder dieses verfehlt. Dazu wird eine *Monte Carlo* Simulation durchgeführt, um eine wahrscheinlichkeitsbasierte *Trefferanfälligkeit* des Systems zu ermitteln. Auf Basis der geometrischen Größe des Systems, einzelner Flugparameter (Geschwindigkeit und Höhe) und der Zieleinstellung der Bedrohung am Boden (unter Berücksichtigung von Winkelfehler in Azimut und Elevation) wird jeweils die projizierte Fläche mit Hilfe von Koordinatentransformationen und weiter die sogenannte *Miss Distance* (Ball 2003) berechnet. In Abbildung 53 rechts sind die einzelnen Schüsse und deren zugehörige *Miss Distance* dargestellt. Die blau hervorgehobene Fläche zeigt die projizierte Größe des Lfz in x-Richtung. Ausgehend von der durchschnittlichen *Miss Distance* (grüne Balken) und der Größe des Objektes wird mit der *Cookie Cutter* Methode[97] (Ball 2003) eine prozentuale Wahrscheinlichkeit für einen Treffer ermittelt[98]. Speziell für diese Darstellung ergibt sich eine Trefferwahrscheinlichkeit von 46,8%.

<u>Flugleistung:</u>

Die Flugleistungen bilden die „klassischen“ Bewertungskriterien für ein Luftfahrzeug (Soban und Mavris 2001) und wurden deshalb ebenfalls mit entsprechenden Modulen für die Berechnung berücksichtigt. Dabei werden sowohl Leistungswerte für Kampfflugzeuge wie bspw. Beschleunigungs-, Steig- oder Kurvenflugleistung als auch Transport- und Ausdauerleistungen berechnet. Grundlage für die Berechnung der Punktleistungen bildet die spezifische Überschussleistung, auf Basis derer die Beschleunigungs-,

[96] Die *Shooting Bouncing Ray* Methode ist ein spezialisiertes Vorgehen für die bistatische und monostatische Berechnung von Fernfeldern und Radarquerschnitten. Dieses Verfahren führt quasioptische Berechnungen für kleine Wellenlängen durch. Für Detailuntersuchungen in der *Rayleigh* oder der *Mie* Region ist dieses Verfahren nicht geeignet.

[97] Eine weitere Methode ist die *Carlton Hit Funktion*, welche ebenfalls implementiert wurde. Aufgrund von Anwendungsempfehlungen aus (Ball 2003)wurde für diese Arbeit allerdings die *Cookie Clutter* Methode genutzt.

[98] keine Selbstschutzmaßnahmen (Defensive Aids) wurden berücksichtigt

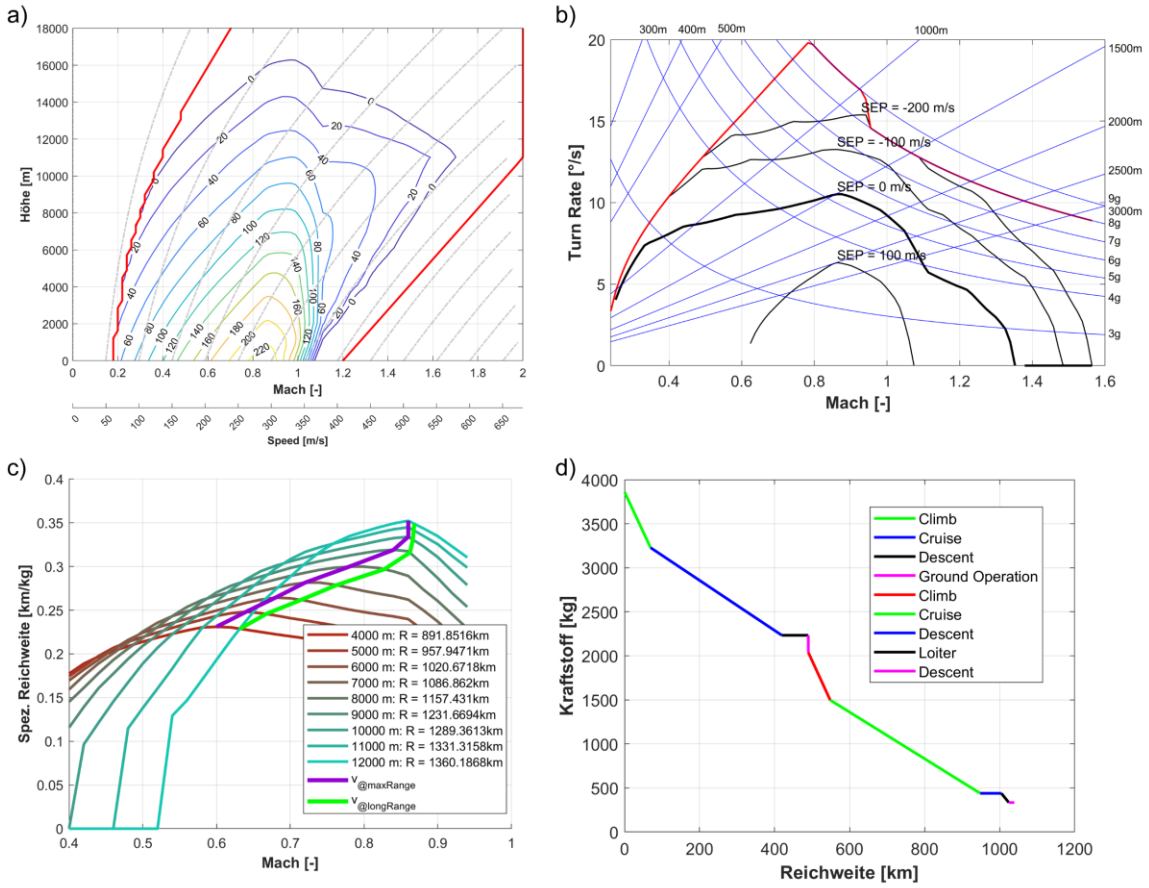


Abbildung 54: Darstellung ausgewählter Parameter der Flugleistungen. *a) Spezifische Überschussleistung (SEP); b) Wenderate (Turn Chart) bei 2000m; c) Spezifische Reichweite bei konstantem Gewicht; d) Kraftstoffverbrauch bei einem speziellen, editierbaren Missionsprofil.*

Steig- und Kurvenflugleistung als auch die Flugbereichsgrenzen berechnet werden. In Abbildung 54a ist die spezifische Überschussleistung (SEP) für ein Lfz mit Nachbrenner (*reheat*) dargestellt, woraus bspw. Flugbereichsgrenzen oder die maximale SEP ermittelt werden kann. Rechts daneben ist die Wenderate (*Turn Chart*) ebenfalls mit Nachbrenner bei einer Höhe von 2000m dargestellt (siehe Abbildung 54b). Auf genaue Erläuterungen der einzelnen Verläufe in diesen Darstellungen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Diese können bspw. bei (Liefer et al. 1990) nachgelesen werden.

Die Modulbezeichnungen sind dabei nicht mit den zu berechnenden *Elementaren Kriterien* gleichzusetzen. Bspw. enthält das Modul für die Kurvenflugleistung die Berechnungsvorschriften für den *minimalen Kurvenflugradius*, die *Stationäre* und *Instationäre Wenderate* mit der entsprechenden optimalen Geschwindigkeit, die *Combat Cycle Time* und die *Pointing Margin*[99]. Das Modul der Transportleistung beinhaltet u.a. die Berechnung der *Transportgüte*, *Transporteffizienz* und *Transportrate* (Gollnick 2004). In Abbildung 54c ist die spezifische Reichweite bei konstantem Gewicht abhängig von der Flughöhe und

[99] Siehe (Tamrat 1988)

Geschwindigkeit aufgeführt. Dabei kann – wie auch für die Reichweite in Abbildung 54d – ein bestimmtes Missionsprofil[100] hinterlegt werden. Diese Ausführungen bilden einen Ausschnitt der implementierten Module ab, welche hier in vollem Umfang nicht erörtert werden sollen.

Zur Berechnung dieser Werte wurden ausgewählte Lfz nachprojektiert, so dass entsprechende Aerodynamik[101]- und Triebwerksdatensätze erzeugt und für eine numerische Leistungsrechnung genutzt wurden. Dazu wird das zugrundeliegende, szenariobasierte Missionsprofil[102] berücksichtigt, welches durch den ET angepasst werden kann. Ausgehend davon kann bspw. eine maximale Reichweite als Optimierungsrechnung eines Streckensegmentes oder die maximale Ausdauer (*Time on Station*, ToS) für ein *Loiter*- Segment bestimmt werden.

Bei der Berechnung der Flugleistung wird ebenfalls die entsprechende Konfiguration berücksichtigt, d.h. interner Kraftstoff sowie externe Lasten und deren zusätzliche Widerstandsfläche. Diese Widerstandsfläche ist abhängig von der umströmten Beladung des Lfz und hat einen erheblichen Einfluss auf die

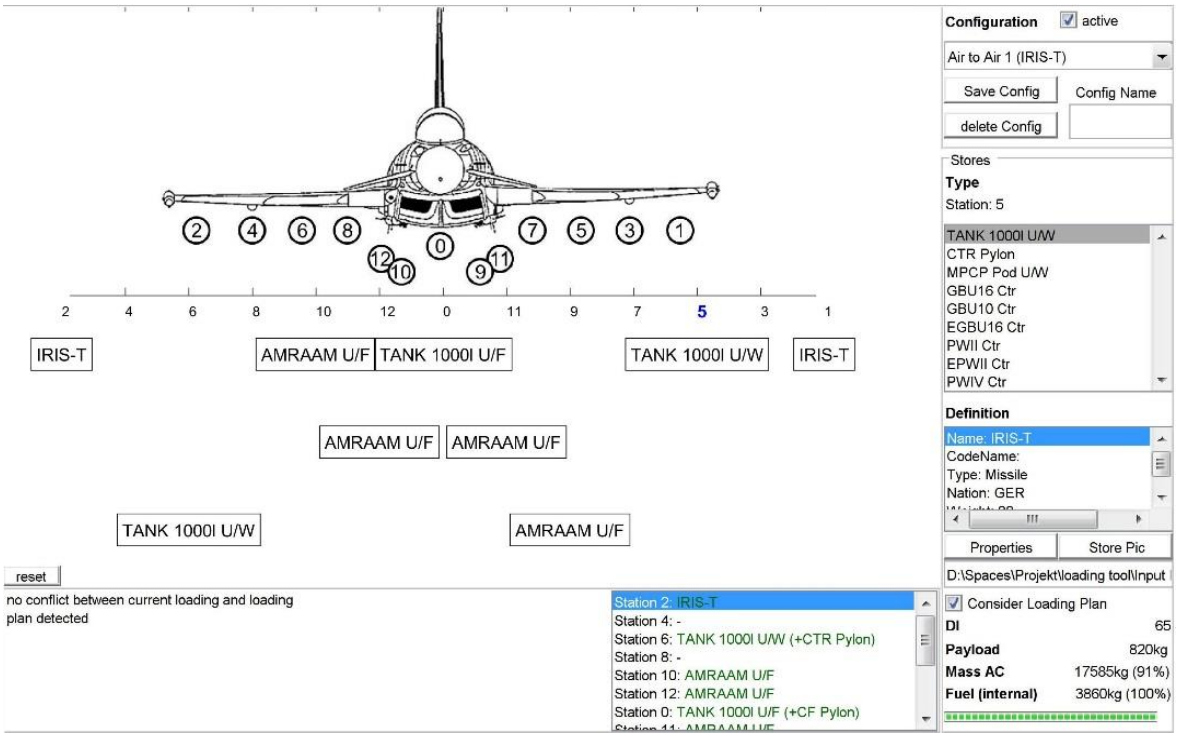


Abbildung 55: Oberfläche zur Beladung der Luftfahrzeuge und Ermittlung der Widerstandsfläche. *Die einzelnen Außenlasten können per Drag&Drop an die jeweilige Position gezogen werden. Ein hinterlegter Beladeplan markiert die möglichen Stationen.*

---

[100] Das Profil kann aus einer Reihenfolge der Segmente *Ground Operation*, *Climb*, *Cruise*, *Descent*, *Loiter* und *Maneuver* zusammengesetzt werden. Bei den einzelnen Segmenten können weitere Parameter definiert werden. Bspw. kann für *Cruise* die Vorschrift nach Breguet (Scheiderer 2008) oder für *Climb* das Steiggesetz vorgegeben werden.

[101] getrimmte Aerodynamik

[102] Ein Missionsprofil beschreibt die Segmente (*climb, cruise, descent, …*) sowie zu zugehörigen Flughöhen. Daraus entstehen Profile wie bspw. HI-HI-HI (möglichst hohe Missionsradien), LO-LO-LO (kompletter Tiefflug) oder HI-LO-HI (An- und Abflug unter reichweiten-optimalen Bedingungen, Zielbekämpfung im Tiefflug.)

Flugleistung. Daher wurde eine Auswahl an Außenlasten (Tanks, Pods) aerodynamisch nachprojektiert[103] und für die Ermittlung der Widerstandsfläche in einer Beladeumgebung integriert. Ein Ausschnitt der Oberfläche ist in Abbildung 55 zu sehen. Darin können auf der rechten Seite die Außenlasten ausgewählt werden, welche durch einen Doppelklick an den nächsten freien Außenlastträger (*Station*) gehangen wird und anschließend mit *Drag&Drop* verschoben werden kann. Im Hintergrund wird über einen flugzeugspezifischen Beladeplan abgeglichen, ob diese Beladung vorgesehen und damit möglich ist. Weiterhin wird anhand der Station der notwendige *Pylon* bestimmt. In der Oberfläche wird der *Drag Index*[104] und das zusätzliche Gewicht (Nutzlast (*Payload*), Kraftstoff (*Fuel*)) berechnet. Diese individuellen, missionsspezifischen Konfigurationen können im Datensatz gespeichert und bei der Berechnung der Flugleistungen berücksichtigt werden.

Umweltwahrnehmung:

Das Kriterium für die *Entdeckungswahrscheinlichkeit* mit Hilfe von elektrooptischer Missionssensorik kann durch unterschiedliche Ansätze quantifiziert werden. Diese sind die *Glimpse Probability*[105] (Macchiarilo 1973), die *Johnson Kriterien* (Johnson 1958) und die *Task Targeting Performance* (Hixson et al. 2004; Vollmerhausen 2004), welche sich alle auf die menschliche Blickwahrnehmung beziehen, deren Schwellwerte für Kontrast oder Pixelgröße aus Feldversuchen ermittelt wurden. Eine weitere Möglichkeit der Quantifizierung wird in (Irvine 1997) vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine Qualitätsmetrik auf einer neunstufigen Skala (Riehl 1996), welche in Abhängigkeit von der Bildqualität die Entdeckungs- bzw. Identifizierungswahrscheinlichkeiten bestimmter Objekte (Personen, Fahrzeuge) qualitativ beschreibt. Ein steigender Skalenwert bedeutet damit, dass mehr Informationen aus den Bilddaten generiert werden können. *NIIRS* ist solch eine subjektive Metrik mit vorwiegender Abhängigkeit von der Bildauflösung. Eine Weiterentwicklung stellt *NVThermIP* (Bijl et al. 2002) dar, welche speziell für bewegte Bilder (Irvine et al. 2007) im Infrarotbereich entwickelt wurde. Aufgrund der direkten Abhängigkeit zur Bildauflösung (Holst 2008) sollen im Folgenden vorwiegend die erstgenannten objektiven Quantifizierungsverfahren betrachtet werden. Da die *Glimpse Probability* weder theoretisch fundiert noch von Forschern und Anwendern akzeptiert wird (Poe 1974), wurde diese zunehmend durch die *Johnson Kriterien* und die *Task Targeting Performance* ersetzt. Aus diesem Grund wird für die Quantifizierung der Kriterien für die Aufklärungswahrscheinlichkeit das Verfahren der *Task Targeting Performance* (Vollmerhausen 2004; Holst 2008) implementiert, welches eine Weiterentwicklung der *Johnson Kriterien* (Johnson 1958) darstellt[106]. Damit wird u.a. auf Basis des Kontrastes in Helligkeit und Farbe zwischen Objekt und Hintergrund sowie der Entfernung und der Auflösung eine Wahrscheinlichkeit für das menschliche *Detektieren*, *Erkennen*

---

[103] Die entsprechende Vorschrift lässt sich in (McDonnell Douglas Astronautics Company 1999) finden

[104] Die zusätzliche Widerstandsfläche wird bezogen auf die Referenzflügelfläche des Lfz angegeben. Dabei wird der *DragIndex* mit dem Faktor 10^{-4} als zusätzlicher Beiwert des Nullwiderstandes definiert.

[105] Die *Glimpse Probability* kommt ursprünglich aus dem menschlichen Suchverhalten, indem bestimmte Bereiche mit den Augen auf Objekte abgesucht wurden. Weitere Arbeiten dazu wurden bspw. von (Blackwell 1946; White und Ford 1960) veröffentlicht. Darin wurden vor allem Feldversuche unternommen, um Schwellwerte für den Kontrast abzuleiten.

[106] Die in Kapitel 5.2.3 erwähnte *Glimpse Probability* wurde aufgrund der geringen Akzeptanz durch die Forscher und der wenig fundierten Ermittlung (Poe 1974) nicht näher betrachtet.

und *Identifizieren* des Objektes berechnet. Grundlage dafür bildet die Transformation der Koordinaten[107] vom erdfesten über das aerodynamische und das flugzeugfeste in das kamerafeste System, so dass die Größe des Objektes auf der Bildebene in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der Entfernung zwischen Sensor und Objekt betrachtet werden kann.

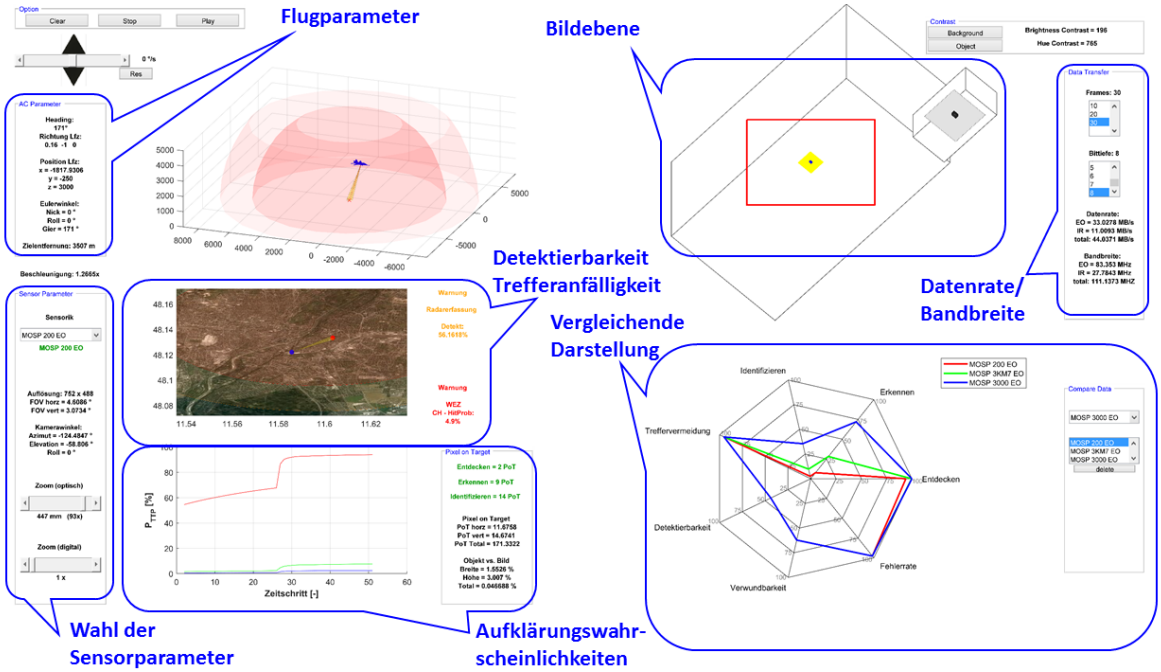


Abbildung 56: Oberfläche zur Simulation der Zuverlässigkeit in Verbindung mit der Überlebensfähigkeit. *Simulationsumgebung zur Berechnung der Aufklärungswahrscheinlichkeit und der Detektierbarkeit/Verwundbarkeit. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit werden Koordinatentransformationen vom erdfesten ins kamerafeste Koordinatensystem durchgeführt. Die Trefferanfälligkeit wird mit Monte-Carlo Simulationen berechnet.*

Zur Berechnung wurde ein BM realisiert, dessen Oberfläche in Abbildung 56 dargestellt ist. Die einzelnen Bereiche der Oberfläche sind entsprechend beschriftet und werden in Abbildung 57 partiell genauer verdeutlicht. Die Trajektorie kann mittels der Flugparameter vorgegeben werden (siehe Abbildung 57a, Panel: *AC Parameters*). Die Sensorkonfiguration kann unten links definiert werden (Panel: *Sensor Parameters*). Darin können verschiedene Missionssensoren – welche in einem entsprechenden Datensatz mit der Sensor- Klasse abgelegt sind (siehe Anhang) – sowie deren Sensorparameter (bspw. Brennweite) ausgewählt bzw. eingestellt werden (siehe Abbildung 57 b). Die Aufklärungswahrscheinlichkeit wird mit der *Task Targeting Performance* berechnet und ist rechts daneben dargestellt.

Der Kontrast zwischen Oberfläche und Objekt kann in Abbildung 57c (Bildebene) rechts oben (Panel: *Contrast*) eingestellt werden. Die berechneten Wahrscheinlichkeiten werden über die Zeitschritte aufgetragen. Zusätzlich wird rechts daneben noch die Objektgröße in Pixel (*Pixel on Target*, PoT) angezeigt. Darüber ist eine Kartendarstellung zu sehen (Abbildung 57b oben), welche das Objekt sowie das Ziel und den Erfassungsbereich einer möglichen Bedrohung (roter Bereich) verdeutlicht. Rechts daneben wird die

[107]Für die Grundlagen der Koordinatentransformation sei an dieser Stelle u.a. auf (Papula 2009) verwiesen.

Detektions- und Trefferwahrscheinlichkeit der Plattform angezeigt. Letztere wird mit der *Cookie Cutter* Methode aus der *Miss Distance* für jeden Zeitschritt berechnet (siehe o.g. Überlebensfähigkeit). In der rechten unteren Ecke in Abbildung 56 ist eine Netzdarstellung[108] zu sehen, welche die Ausprägungen für unterschiedliche Missionssensoren zeigt. Diese können rechts ausgewählt werden.

Rechts oben in Abbildung 56 ist der Bildbereich des Sensors zu sehen (Abbildung 57c), welcher die Größe des Objektes im Bildbereich verdeutlicht. Ausgehend von der Abtastrate des Sensors (*FrameRate*), der Bittiefe (*BitDepth*) und der Anzahl der Kanäle (Farbe) ergibt sich eine entsprechende Datenmenge, welche übertragen werden muss. Die Abtastrate und die Bittiefe kann rechts ausgewählt werden. In diesem Fenster werden ebenfalls die errechnete Datenrate und die damit verbundene notwendige Bandbreite für die Übertragung angezeigt.

Das Ergebnis für die berechnete Aufklärungswahrscheinlichkeit ist noch einmal detailliert in Abbildung 58 dargestellt. Eine luftgestützte Plattform mit einem

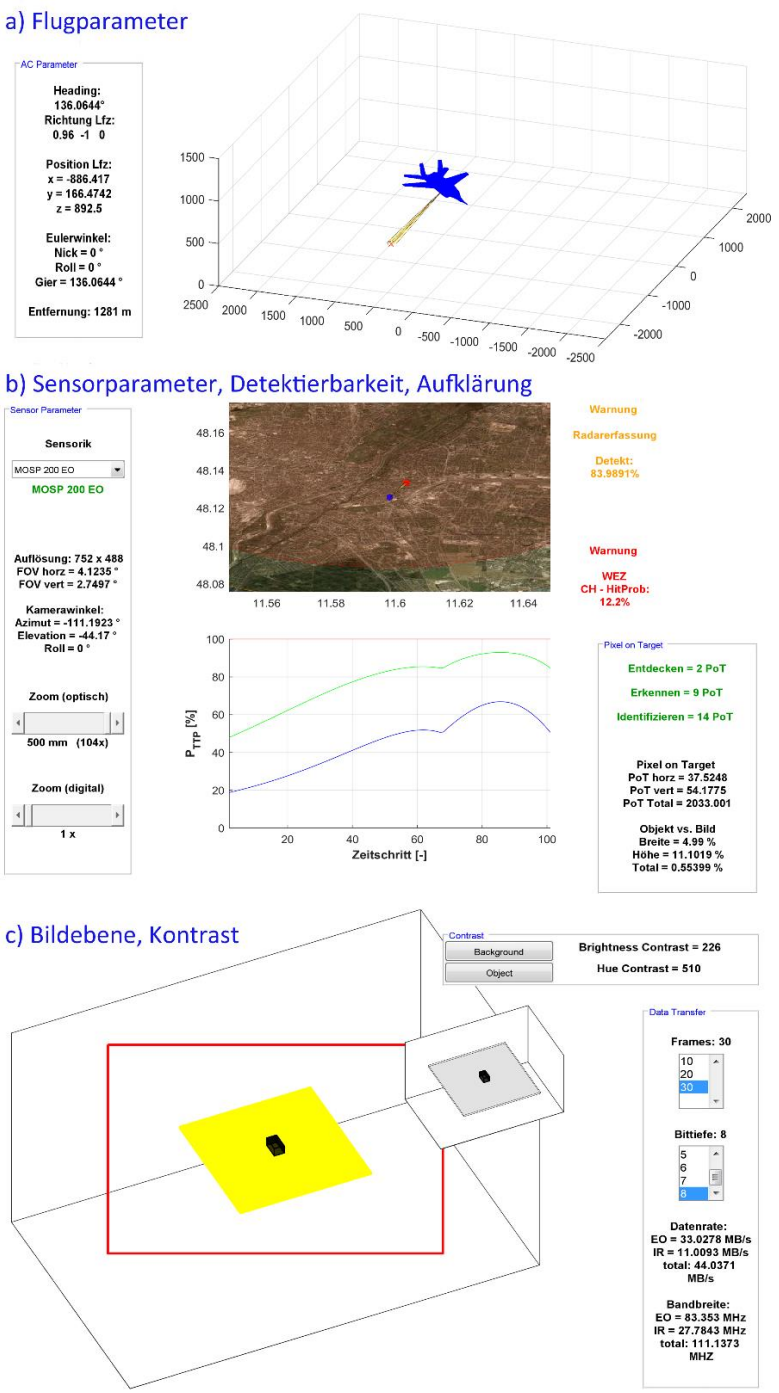


Abbildung 57: Darstellungen der Panels der Simulationsoberfläche. *Das obere Bild a) zeigt die Wahl der Flugparameter und die Positionierung des Lfz und des Objektes,, das mittlere Bild b) zeigt die Aufklärungswahrscheinlichkeit sowie die Position in Geokoordinaten und Bild c) die Darstellung der Bildebene des Sensors für EO und IR und die notwendige Übertragungsrate.*

[108] Die Netzdarstellung wird genauer in Kapitel 5.4.1 erklärt und soll an dieser Stelle nicht näher erläutert werden.

optischen Missionssensor umfliegt ein am Boden stehendes Fahrzeug und kann dieses mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit entdecken, erkennen und identifizieren (rechts). Es zeigt sich, dass aufgrund der geringen Sensorauflösung (752x582) ein Erkennen oder Identifizieren unwahrscheinlich ist. Mit diesem Modul können die perzeptiven Wahrscheinlichkeiten in beliebigen Szenarien sowie weitere statische Daten wie die maximale Reichweite für das Erkennen, Entdecken und Identifizieren berechnet werden.

Neben der Wahrscheinlichkeit für die Aufklärung (siehe Abbildung 19, *Zuverlässigkeit*) ist ebenfalls die aufgeklärte Fläche pro Zeit als *Aufklärungsrate* sowie die Überlappung des Sensorsichtfeldes am Boden (*Entropie*) relevant (siehe Abbildung 19, *Leistung*). Diese werden unter Berücksichtigung der flugmechanischen Parameter wie Fluggeschwindigkeit und –höhe und entsprechender Sensorparameter wie Framerate und Öffnungswinkel ebenfalls unter Nutzung der obigen Simulationsumgebung ermittelt. Die Wechselwirkung zwischen *Aufklärungsrate* (Aufgeklärter Fläche pro Zeit) und der *Entropie* wird in Kapitel 5.3.2 näher erläutert.

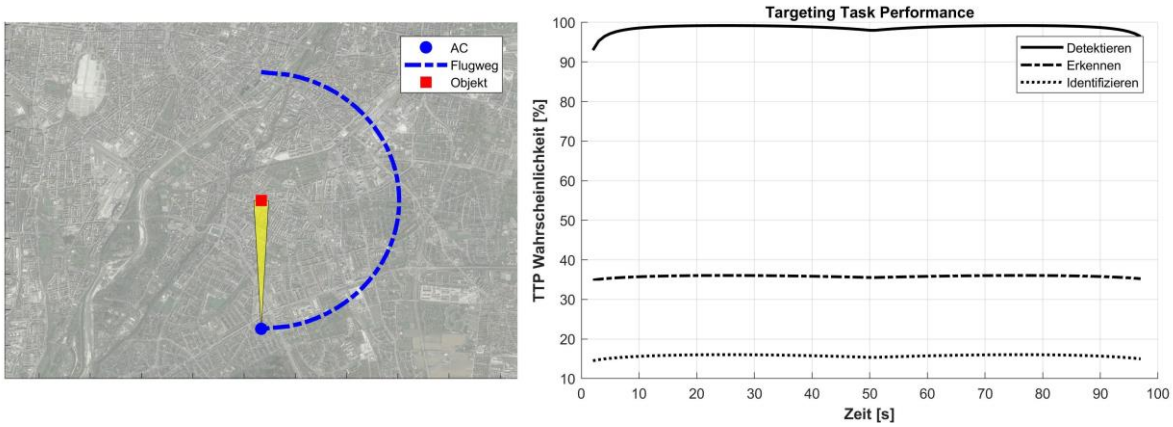


Abbildung 58: *Task Targeting Performance* für die Umkreisung eines Objektes. *Flughöhe = 3000m, Objekt = PKW, Auflösung = 752x582, Sensorgröße = 36x24mm, Brennweite = 500mm.*

Für eine Berechnung des *Informationslevels* sind neben der Sensorik ebenfalls der nachgeschaltete Algorithmus zur Bildverarbeitung sowie die verfügbaren Ressourcen zur Datenverarbeitung zu betrachten. Dies stellt einen weiteren Forschungsschwerpunkt am Institut für Flugsysteme dar (Hellert und Stütz 2017; Smirnov und Stütz 2016; Stütz 2016). Die dazu entwickelten Umgebungen sollen allerdings an dieser Stelle keine Anwendung finden, da sie eine Vielzahl von Parameter benötigen und als ersetzbares BM für das *Informationslevel* verstanden werden können. Für eine vereinfachte Abbildung wurde in dieser Arbeit eine Tabelle entwickelt, welche die Informationslevel auf Basis der Verarbeitungsfähigkeiten des luftgestützten Systems beschreibt (Morawietz et al. 2016). Aus diesem Grund ist in Abbildung 52 eine gestrichelte Umrandung zu erkennen. In Verbindung damit kann mit dem Modul *Datentransfer* die anfallende Datenmenge sowie die notwendige Bandbreite des Datenlinks ermittelt werden. Die maximale Entdeckungsreichweite kann sowohl für elektrooptische und infrarote Sensoren als auch für Radare berechnet werden.

Erfassungsreichweite Radar:

Die Erfassungsreichweite des Pulse Doppler Radars ist von vielen Faktoren abhängig, welche nicht nur das System, sondern auch das zu detektierende Objekt betreffen. Dabei ist besonders die Radarquerschnittsfläche (*Radar Cross Section*, RCS) zu nennen, welche einen erheblichen Einfluss auf die Reichweite hat. Die Gleichung für die Berechnung der Reichweite lautet (Strohal und Stütz 2018):

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{avg} G_t \sigma A_e t_{ot}}{(4\pi)^2 S_{\min} L}} = \sqrt[4]{\frac{P_{avg} \sigma A_e^{\,2} t_{ot}}{(4\pi)\left(\frac{S}{N}\right)_{req} \cdot NF \cdot kT_o \lambda^2 L}} \tag{15}$$

Weiterhin ist u.a. die Sendeleistung sowie die Apertur der Antenne und das Signal/Rausch Verhältnis relevant. Für die Ermittlung der Reichweite wird ein Standardobjekt mit einer RCS von 3m² angenommen, wodurch die Ausprägungen vergleichbar sind.

Die Implementierung erfolgt gemäß der obigen Gleichung (15) und steht als analytisches Modul zur Berechnung der Kriterienausprägung *"Erfassungsreichweite Radar"* zur Verfügung. In Abbildung 59 ist die Erfassungsreichweite eines Radars mit einer Entdeckungswahrscheinlichkeit von 80% und einer Falschalarmrate kleiner 0,003 in Abhängigkeit der Sendeleistung und der RCS des zu detektierenden Objektes dargestellt. Bei einer RCS des Zielobjektes von 3m² und einer Leistung von 5kW würde das Radar das Objekt mit einer 80 prozentigen Wahrscheinlichkeit auf eine maximale Entfernung von 207km detektieren können.

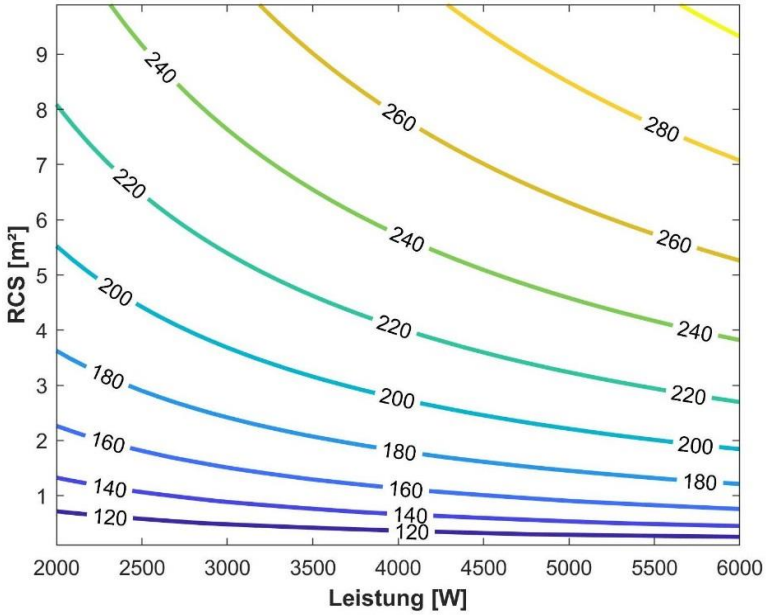


Abbildung 59: Erfassungsreichweite Radar [km] vs. RCS und Leistung. *In der Darstellung ist die Erfassungsreichweite eines Pulse Doppler Radars mit einer Entdeckungswahrscheinlichkeit von 80% und einer Falschalarmrate kleiner 0,003 in Abhängigkeit des Radarquerschnittes des Objektes und der Sendeleistung des Radars als Konturlinien aufgetragen.*

Wie bereits erwähnt, benötigt die Berechnungsvorschrift in den einzelnen Modulen die zugrundeliegenden Datensätze für die betrachteten Alternativen. Diese enthalten alle relevanten Eingangsdaten wie u.a. Geometrie-, Aerodynamik-, Triebwerks-, Sensor- und Bewaffnungsdatensätzen. Die Datensätze sind dabei Instanzen einer eigenen Klassenstruktur, welche ebenfalls im Anhang genauer erläutert ist.

In Abbildung 60 ist ein Geometriedatensatz visualisiert, welcher aus einzelnen geometrischen Größen für die Komponenten des Lfz (Rumpf, Flügel, Leitwerk, Klappen) besteht. Das Aerodynamikmodell besteht aus dem Beiwert für den Nullwiderstand und der Polare[109] (oben rechts) mit und ohne Hochauftriebssysteme. Diese Darstellungen werden bei der Verifizierung der Datensätze in Kapitel 6.2.1 erneut aufgegriffen.

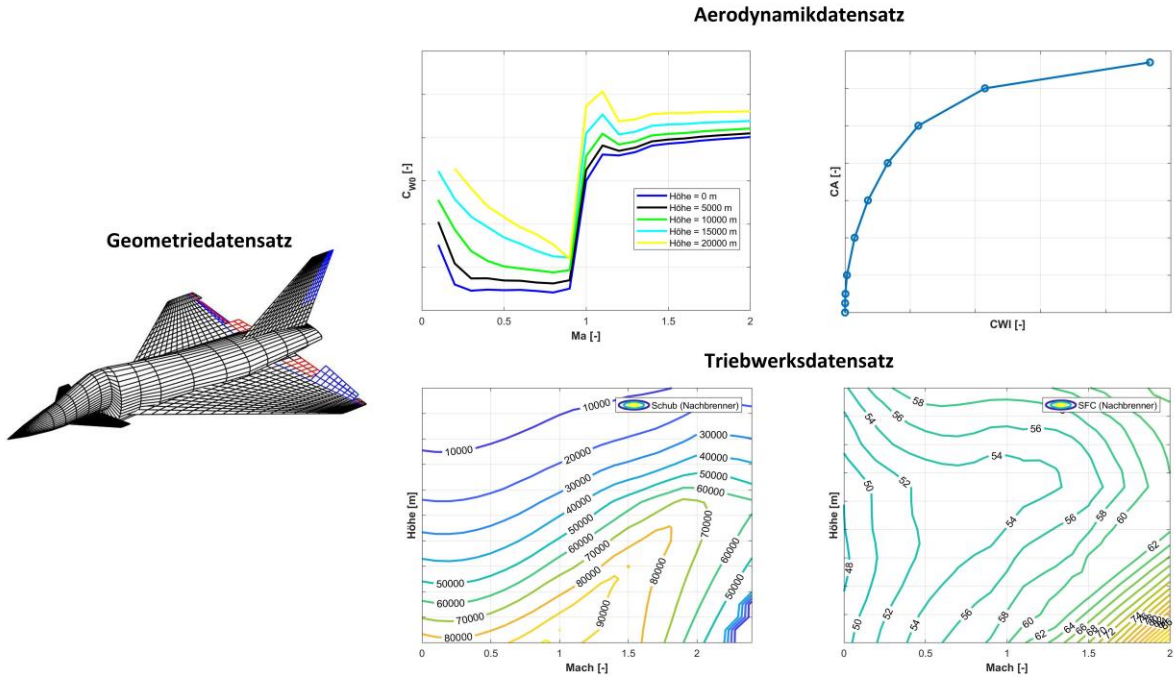


Abbildung 60: Übersicht der Datensätze für die Flugleistungsrechnung. *Überblick über die notwendigen Datensätze für eine numerische Flugleistungsrechnung mit Interpolationen und Iterationen.*

Das Triebwerksmodell besteht aus dem Schub über Höhe, Machzahl und Drosselgrad (unten links) sowie aus den entsprechenden spezifischen Kraftstoffverbräuchen für Trocken- und Nassschub. Letzterer ist unten rechts dargestellt. Diese Daten wurden mit *Gasturb*[110] erzeugt und werden neben weiteren für die Sensorik (bspw. Brennweite, Framerate, Antennengröße und Leistung des Radars) oder die Überlebensfähigkeit (bspw. Radarquerschnitt) in den entsprechenden Attributen der Klassenmodule hinterlegt.

Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten oder Kriterien können dazu führen, dass eine ganzheitliche Berechnungsumgebung zur Ermittlung der Ausprägungen zu nutzen ist. Daneben bestehen bei nicht korrelierten Einträgen die Möglichkeiten der alleinigen Berechnung der *Elementaren Kriterien* durch eine entsprechende Methode des Klassenmoduls (wie in diesem Abschnitt gezeigt wurde). Dies kann bspw. die Erfassungsreichweite eines Radars sein, welche neben den Systemparametern der Missionssensorik und der Beschaffenheit des zu detektierenden Objektes keine weiteren direkten Wechselwirkungen mit

[109] Auftriebsbeiwert (C_A) über dem Widerstandsbeiwert (C_W)
[110] http://www.gasturb.de/; zuletzt besucht am 28.08.2017

anderen Fähigkeiten aufweist. Daneben sind BM zu entwickeln, welche direkt korrelierte Kriterien berechnen können. Ein entsprechendes Beispiel dafür soll im nächsten Kapitel behandelt werden.

5.3.2 Berechnungsmodule für korrelierte Kriterienausprägungen: Pareto Fronten

In diesem Kapitel sollen zwei Kriterien mit einer direkten negativen Wechselwirkung betrachtet werden, um neben der Ermittlung der Ausprägungen für nicht korrelierte Kriterien den Einsatz der Berechnungsvorschriften für korrelierte Kriterien zu demonstrieren. Als Aufgabe wird eine Objektdetektion (Person) auf einer Straße betrachtet, für welche die *Aufklärungsrate*[111] einer luftgestützten Plattform in Verbindung mit der *Entropie*[112] betrachtet wird. Beide Kriterien verfolgen konfliktäre Zielfunktionen und weisen durch die direkte zeitliche Relation eine stark negative Korrelation auf. Wie bereits in Kapitel 4.3.1.2 erläutert, ergibt sich ein Optimierungsproblem, welches zur Ermittlung der Kriterienausprägungen für die *Aufklärungsrate* und die *Entropie* mit dem Verfahren die Pareto-Optimalität zu lösen ist. Dazu wurde die *Normalized Normal Constraint Method* implementiert. Die Theorie lässt sich bei (Messac et al. 2003) finden. Mit dieser Methode werden die Pareto-optimalen Lösungen aus allen Punkten der Menge gefunden. Die notwendigen Prozesse sind in dem Flussdiagramm in Abbildung 61 dargestellt.

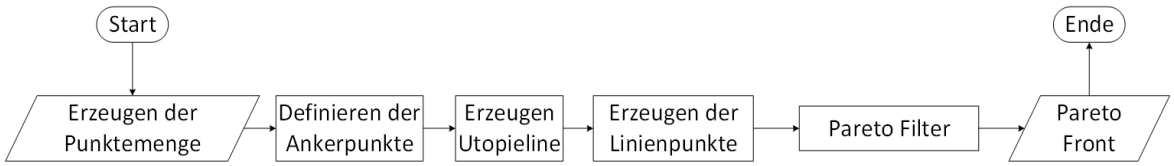


Abbildung 61: Ablauf der *Normalized Normal Constraint Method*. *Durch die Realisierung der NNCM können die pareto-optimalen Punkte einer Menge bestimmt und anschließend die beste Kompromisslösung im Hinblick auf die Präferenzen des ET mit Hilfe des Pareto Filters berechnet werden.*

Nach der Erzeugung der Punktemenge durch Parametervariation werden die Ankerpunkte der Front bestimmt, welche anschließend mit einer sogenannten Utopielinie verbunden werden. Die Ankerpunkte werden hinschlich deren Abstände normalisiert und es wird ein Vektor aus der Differenz der normalisierten Ankerpunkte gebildet und in äquidistante Abstände aufgeteilt. Diese Punkte werden anschließend zur Generierung der Pareto-Punkte mittels eines Pareto Filters genutzt. Das Flussdiagramm des implementierten Filters ist in Abbildung 62 dargestellt. Dazu wird jeder Punkt der möglichen Menge des Systems, welcher unterhalb bzw. oberhalb (abhängig von der Zielfunktion der Kriterien) der Utopielinie liegt, mit jedem anderen generierten Punkt der möglichen Menge verglichen. Wenn ein Punkt nicht Pareto-optimal ist, also zum Beispiel nicht am Rand der möglichen Menge liegt und auch nicht – je nach

[111] Die Aufklärungsrate beschreibt die aufgeklärte Fläche pro Zeit eines Sensorsystems. Dabei wird das Sichtfeld des Sensors [m²] betrachtet und über die Flugzeit integriert.

[112] Generell beschreibt die *Entropie* die durchschnittliche Unvorhersehbarkeit einer Zufallsvariable. Für Überwachungsmissionen können mehrere Observationen eines Zielpunktes wertvoll sein (Bradley und Atkins 2014). Das Erfassen mehrerer gleicher Bildpunkte hat den Vorteil, dass redundante Daten bereitgestellt werden und ggf. Anomalien (bspw. Absuchen von Straßen oder Pipelines) entdeckt werden können. Die *Entropie* ist maximal, wenn keine Überlappung der Bilder stattfindet. Die erhöhte Überlappung der Bilder führt zu einer geringen *Entropie*, weshalb die Zielfunktion entsprechend zu minimieren ist.

eingegebener Forderung – der Zielfunktion (bspw. Maximum oder Minimum) der Kriterien entspricht, wird dieser eliminiert, d.h. zu jedem Punkt wird die Pareto-optimale Bedingung geprüft.

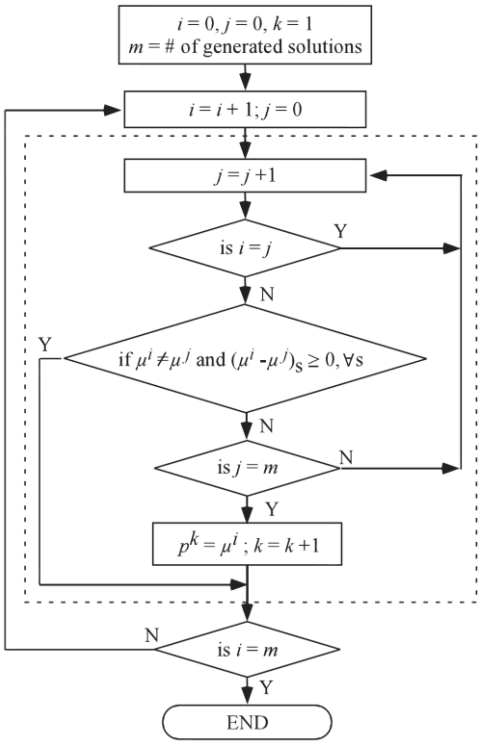


Abbildung 62: Pareto-Filter der *Normalized Normal Constraint Method.* *Der Filter eliminiert alle dominierten Punkte aus der vorgegebenen Menge, so dass Schlussendlich die Pareto Front übrig bleibt.*

Zur Erzeugung der Punktemenge für das Beispiel aus Kapitel 4.3.1.2 wurde die Berechnungsumgebung aus Kapitel 5.3.1 genutzt, welche ausgehend von den Sensorparametern das Sichtfeld des Sensors am Boden bestimmt und in Verbindung mit der Abtastrate und der Fluggeschwindigkeit die *Aufklärungsrate* und die *Entropie* berechnet. Dabei wurde als Beschränkung angenommen, dass keine Lücken zwischen den Sensorsichtfeldern entstehen dürfen und sich diese überlappen müssen. In Abbildung 63 ist das Ergebnis dargestellt. Die linke und die mittlere Grafik zeigen das Sichtfeld des Sensors am Boden. Der rote Punkt markiert das aufzuklärende Ziel und der blaue Punkt markiert die sensortragende Plattform. Die rechte Grafik zeigt die Wahrscheinlichkeit für das Erkennen, Entdecken und Identifizieren des Objektes anhand der Methode der *Task Targeting Performance*, deren Implementierung in (Vollmerhausen 2004; Holst 2008) nachgelesen werden kann. Die Aufklärungsrate wurde durch Integration des Sensorfeldes über die Zeit errechnet, wobei überlappende Flächen nicht integriert wurden. Die *Entropie* wurde hingegen aus der Überlappung dieser Sensorflächen über die Zeit ermittelt. Das Ergebnis der Berechnung ist eine *Pareto-Menge* wie bereits in Kapitel 4.3.1.2 Abbildung 31 gezeigt. Dabei wurden

Abbildung 63: Darstellung der *Entropie* (Überlappung des *Footprints*) durch das Sensorsichtfeld am Boden. *Der gelbe Bereich zeigt das Sensorsichtfeld einer nach unten gerichteten Kamera. Die Überlappungen der Bereiche (rot in der linken Abbildung) beschreiben die Entropie. Die rechte Grafik zeigt die Wahrscheinlichkeit für das Entdecken, Erkennen und Identifizieren eines Objektes über die Zeitschritte.*

als begrenzende Kriterien eine Entdeckungswahrscheinlichkeit größer 80% sowie eine lückenlose Abdeckung zwischen den Sensorsichtfeldern gefordert. Durch Anwenden der WSSM-Methode kann die Ausprägung der korrelierten Kriterien mit der entsprechenden Gewichtung berechnet werden.

5.4 Ergebnisanalyse

Wie bei der Methodenbewertung aus Kapitel 4.3.2.4 erwähnt, wurden neben *Promethee* noch weitere MCDA- Methoden wie *Topsis*, *Simple Additive Weighting* (SAW) und die *Nutzwertanalyse* (NWA) realisiert. Diese Methoden können ebenfalls zur Bestätigung des Ergebnisses angewählt werden, wobei *Promethee* als präferierte Methode immer gesetzt ist und nicht abgewählt werden kann. Die genannten Methoden wurden in einer Klassenstruktur eingebettet, welche im Anhang dargestellt ist.

5.4.1 Berechnung des Systempotentials

Das Ergebnis wird auf allen Zwischenebenen der Hierarchie berechnet und zu einem Gesamtergebnis aggregiert. Dieses wird in Form einer Rangfolge[113] aus dem prozentualen Erfüllungspotential SPP (siehe Kapitel 4.2.1.1) berechnet. Ein einheitliches Flussdiagramm der einzelnen Prozeduren der Methoden ist im Anhang zu finden.

Alle MCDA- Methoden benötigen identische Grundeingangsdaten. Einige Methoden wie *Promethee* oder *NWA* benötigen zusätzliche Präferenzdaten, welche in den jeweiligen Klassen als Attribute hinterlegt sind. Die Ergebnisse werden auf jeder Ebene der Hierarchie für jedes Elternkriterium ermittelt, wodurch der Prozess erst beendet ist, wenn das Systempotential auf der obersten Ebene berechnet wurde. Vorher wird innerhalb einer Schleife jedes Elternteil berechnet, wodurch keine einfache Aggregation der Zwischenergebnisse sondern eine gewichtete Zusammenführung der entsprechenden *Elementaren Kriterien* durchgeführt wird. Dies führt dazu, dass sich Stärken und Schwächen nicht einfach ausgleichen können. Die Ergebnisse der Methoden werden auf 0% - 100% normiert, wobei entweder 0% durch die schlechteste Alternative und 100% durch die beste Alternative (siehe *Topsis*) oder aber 100% durch eine absolut dominante Alternative (siehe *Promethee*) bzw. durch globale Grenzwerte festgelegt werden. Dadurch ergibt sich das *System Performance Potential* (SPP) der betrachteten Alternativen auf einer entscheidungsabhängigen Normierungsskala, welche entweder von den betrachteten Alternativen oder globalen Referenzwerten abhängig ist.

---

[113] *Ranking* beschreibt nach (Strassert 1995) die streng ordinale Rangrepräsentation von Alternativen. Dazu werden die Alternativen in eine ordinale Reihenfolge (Alt1 > Alt2 > Alt3) gebracht, wobei die Ränge entsprechend numerisch repräsentiert werden (3>2>1). Bei einer zusätzlich betrachteten Alternative ändert sich die Einstufung zu: Alt1 > Alt2 > Alt4 > Alt3, was zu einer Veränderung der numerischen Repräsentation aller Alternativen führt (4>3>2>1). Bei dem *Rating* können die Ausprägungen der Kriterien mit einem Maßstab gemessen werden, welcher von diesen unabhängig ist. Die damit vorgegebenen Punkte werden durch die zusätzliche Betrachtung einer weiteren Alternative im Vergleich zum *Ranking* nicht verändert (Stabilität). Das *Rating* wäre bspw. die prozentuale Aufklärungsleistung einer luftgestützten Sensorplattform. Werden mehrere Plattformen betrachtet, ergibt sich aus dem *Rating* ein *Ranking*. Wird eine zusätzliche Alternative betrachtet, bleibt das *Rating* der vorherigen Alternativen konstant, während sich das *Ranking* im Falle einer dominanten Alternative ändert.

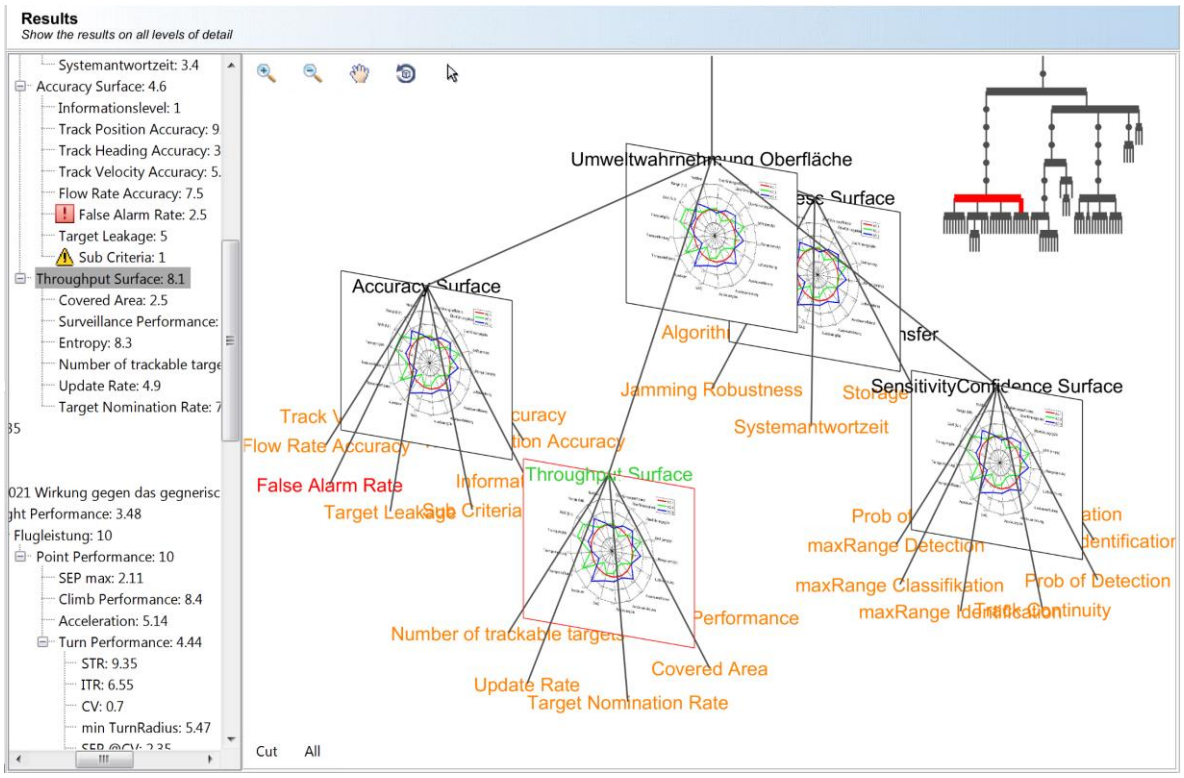


Abbildung 64: Auswahl des Knotens für die Darstellung der Ergebnisse. *Der ET bekommt die gesamte Struktur der Kriterien angezeigt und kann sich in jedem Knoten die Ergebnisse anzeigen lassen. Dazu ist eine Auswahl des entsprechenden Bildes unter den Kriterien notwendig (rote Umrandung). In dieser Darstellung wurde als Knoten der Durchsatz (throughput) für die Informationsaufnahme gewählt. Es zeigt sich, dass zu dem Elternkriterium Genauigkeit (accuracy) ein neues Kriterium hinzugefügt wurde. Ebenso wurde eine Beschränkung für die Falschalarmrate definiert. Diese Anpassungen werden durch die Icons hervorgehoben.*

Das Ergebnis der Bewertung lässt sich auf allen Detailebenen anzeigen und somit nachvollziehbar verfolgen. Für die Auswahl kann der ET einen Knotenpunkt der Kriterienhierarchie wählen und sich in diesem Knoten die Ergebnisse darstellen lassen. In Abbildung 64 wird die gesamte Struktur des resultierenden Baumes in identischer Weise zu der einzelnen Blockstruktur in Abbildung 42 (Kapitel 5.1) dargestellt. Rechts wird der dreidimensionale Baum für den Knoten *Umweltwahrnehmung Oberfläche* gezeigt. Dieser zerfällt in die Genauigkeit (*accuracy*), die Zuverlässigkeit (*sensitivity*), die Verzögerung (*timeliness*) und die Leistung (*throughput*). Die EK sind orange, beschränkte Kriterien rot dargestellt. So wurde die Falschalarmrate (*false alarm rate*) durch den ET mit einer Beschränkung (*Constraint*) versehen. Dies ist auch in der linken Liste mit einem Icon verdeutlicht. Weiterhin ist zu erkennen, dass durch den ET qualitativ ein Kind-Kriterium zu der Genauigkeit (*accuracy*) hinzugefügt wurde (*Sub Criteria*). Um sich die Ergebnisse für einen speziellen Knoten anzeigen zu lassen, ist die Netzdarstellung unterhalb des Knotens anzuwählen (roter Rahmen).

Das Ergebnisfenster in Abbildung 65 wird für das ausgewählte Kriterium Leistung (*throughput*) erstellt. Dies zeigt im unteren Bereich rechts die berechnete Rangfolge für den gewählten Knoten. Links daneben sind die einzelnen Flüsse der MCDA- Methode *Promethee* sowie eine Nutzen/Kosten Aufstellung (links)

zu sehen. Der obere Bereich zeigt ein Netzdiagramm (*Polar Plot*), dessen einzelnen Achsen die entsprechenden Kindkriterien des gewählten Eintrages darstellen. Die einzelnen Oberflächen sind links entsprechend beschriftet und sollen im Folgenden genauer erläutert werden.

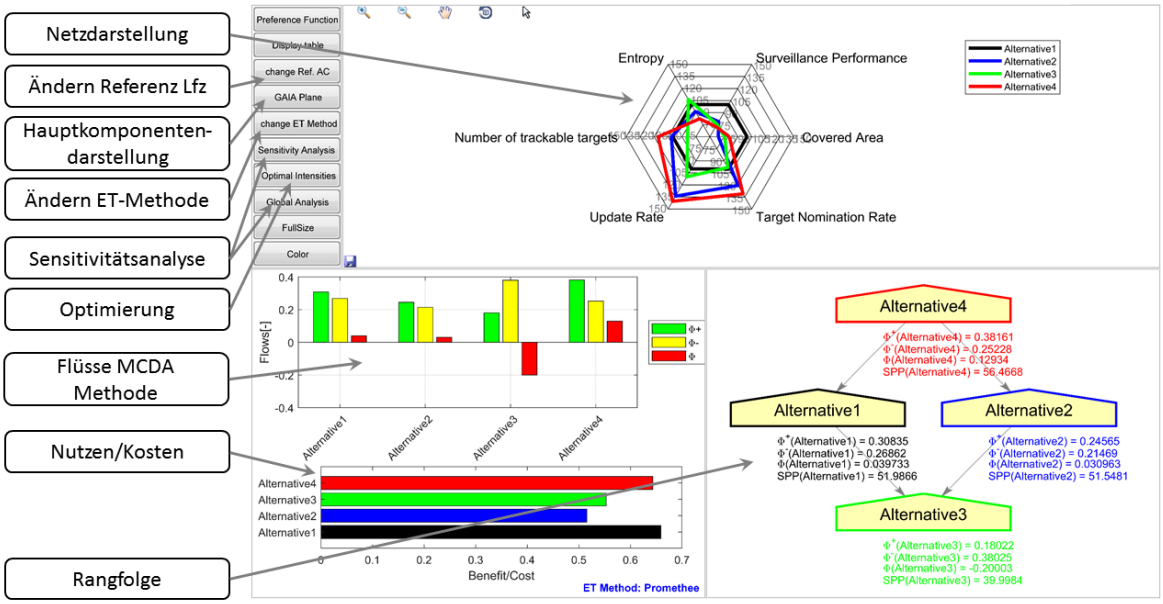


Abbildung 65: Ergebnisfenster des DSS. *Das Ergebnisfenster erscheint nach Wahl des Knotens (hier Knoten „Leistung" des Eintrages „Abbildenden Aufklärung" vgl. Abbildung 19). Es zeigt unterschiedliche Darstellungsformen und eine Auswahlmenü mit Buttons, mit denen weitere Aktionen durchgeführt werden können. Bei der Wahl eines Kriteriums im oberen Netzdiagramm wird das Ergebnisfenster für dieses Kriterium geöffnet.*

Die Rangfolge der Alternativen in Abbildung 66 oben wurde mit der MCDA- Methode *Promethee* (siehe Kapitel 4.3.2.3) berechnet, welche auch Unvergleichbarkeiten zwischen den Alternativen ermitteln kann. Solch eine Unvergleichbarkeit kann zwischen Alternative 1 und Alternative 2 festgestellt werden. Unterhalb der Alternativen sind sowohl methodenspezifische Parameter als auch das resultierende SPP für den betrachteten Knoten aufgeführt. Die Parameter für *Promethee* sind die Ein- und Ausgangsflüsse sowie der daraus resultierende Nettofluss (siehe Kapitel 4.3.2.3), welche als einzelne Balken in Abbildung 66 unten dargestellt sind. Der Ausgangsfluss ϕ^+ beschreibt die Vorteile einer Alternative. Der Eingangsfluss ϕ^- beschreibt hingegen, wie stark eine Alternative von den anderen dominiert wird. Der Nettofluss ϕ ergibt sich aus einer Verrechnung beider Flüsse. Für alle weiteren implementierten Methoden werden die entsprechenden Parameter bei deren Auswahl ebenfalls aufgeführt.

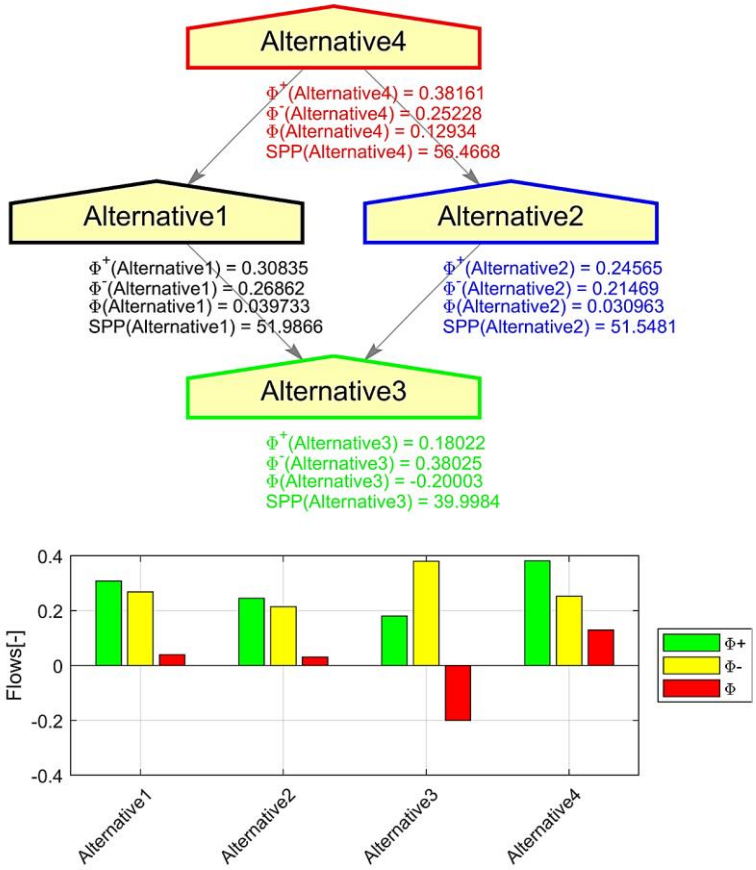


Abbildung 66: Rangfolge der Alternativen berechnet mit *Promethee* und methodenspezifische Parameter für den Knoten *Leistung* (vgl. Abbildung 19). *Die obere Darstellung zeigt die Rangfolge der Alternativen. Darunter sind die methodenspezifischen Daten (Flüsse bei Promethee) und das resultierende SPP aufgeführt. Die untere Darstellung zeigt die Details zu diesen Flüssen für die betrachteten Alternativen.*

Das Verhältnis von Nutzen/Kosten (Abbildung 65 unten links) stellt für jede Alternative die Relation von SPP zu den anfallenden Lebenszykluskosten auf. Die Aufstellung der Kosten wurde der Dienstvorschrift für das *Lift Cycle Cost Management* (Bundesministerium der Verteidigung 2016) innerhalb des Beschaffungsmanagements der Bundeswehr entnommen. Darin wird eine Kostenstruktur bestehend aus technisch, wirtschaftlichen Anteilen, Personal/Ausbildung, Logistik und Infrastruktur vorgeschlagen. Weiterhin wurden die Anschaffungskosten berücksichtigt. Für einen ausgewählten Teil dieser Kosten (Infrastruktur, Logistik) wurden ebenfalls Berechnungsvorschriften in einem Kostenmodell entwickelt (Kurz 2016). Dieses Verhältnis wird aus dem normierten SPP und den normierten Kosten gebildet, so dass dieses stets kleiner 1 ist. In dem betrachteten Beispiel hat Alternative 1 ein besseres Verhältnis als die erstplatzierte Alternative 4, was auf geringere Kosten zurückzuführen ist. Diese Effizienzbetrachtung ermöglicht dem ET, eine Entscheidung abhängig von dem Nutzen oder von dem Nutzen/Kosten Verhältnis abzuleiten.

Zur detaillierten Darstellung der Stärken und Schwächen bzgl. der einzelnen Kriterien wurden zwei weitere Formen der Darstellung implementiert. Diese sind zum einen eine Netzdarstellung und zum anderen eine zweidimensionale Darstellung auf Basis einer Hauptkomponentenanalyse. Beide Darstellungen sind in Abbildung 67 zu sehen (oben: Netzdarstellung, unten Hauptkomponentendarstellung). Die Netzdarstellung bildet besonders gut die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Alternativen ab. Damit lassen sich für den ET insbesondere Soll-Ist Abweichungen oder direkte Vergleiche zwischen einzelnen Lfz durchführen. Dazu ist vom ET eine Referenz zu wählen (siehe Abbildung 65, Button „*Change Ref*“ in der linken Liste), welche bspw. durch ein militärisches Lfz im Rahmen einer Bedrohungsanalyse oder durch ein frei gewähltes Lfz repräsentiert wird. Jedes Kriterium wird über eine Achse repräsentiert. Dabei gilt

für alle Achsen die gleiche Orientierung. Eine Verbesserung – unabhängig von der zugrundliegenden Zielfunktion des Kriteriums – wird durch eine höhere Erfüllung verdeutlicht. Daher sind die Ausprägungen auf den Achsen prozentual auf die Referenz (Baseline) bezogen. Im gezeigten Beispiel ist die Referenzalternative *Alternative 1* (schwarz). Diese kann geändert werden, so dass direkte Stärken und Schwächen der Alternativen in Relation zu der gewählten Referenz abgebildet werden können. Der ET hat die Möglichkeit, durch die Auswahl eines Kriteriums die Ergebnisse für dessen Kinder eine Ebene tiefer in der Hierarchie zu betrachten.

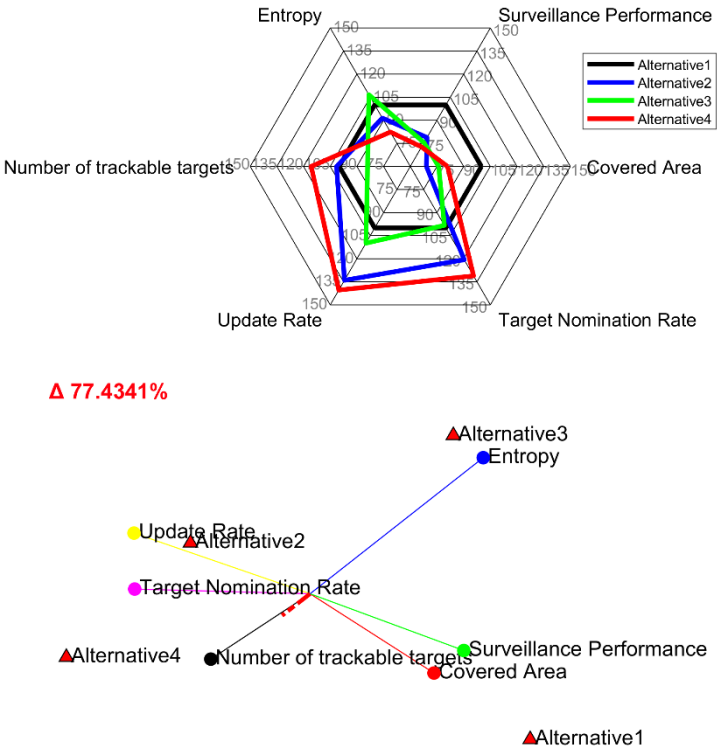


Abbildung 67: Netzdarstellung und Hauptkomponentendarstellung für den Knoten *Leistung* (vgl. Abbildung 19). *Die Netzdarstellung erlaubt die vergleichende Darstellung der Systemfähigkeiten. Mit der Hauptkomponentendarstellung kann durch eine weitere Darstellungsform die Orthogonalität der Kriterien überprüft und die Informationen in einem sogenannten Entscheidungsstrahl (Decision Stick, rot gestrichelt) zusammengefasst werden.*

Mit den einzelnen Kriterien ist eine vergleichende Aussage möglich, allerdings lassen sich diese nicht mehrdimensional vergleichen, außer eine Alternative ist in allen Kriterien besser als eine Referenz. Für eine mehrdimensionale Vergleichbarkeit ist das Ergebnis einer entsprechenden Verrechnung durch MCDA- Methoden notwendig, welches in der Netzdarstellung nicht angezeigt wird. Solch eine Darstellung des Ergebnisses kann allerdings mit der *GAIA*- Ebene (*Geometrical Analysis for Interactive Assistance*) realisiert werden. Neben der klassischen Rangdarstellung des Ergebnisses wurde dazu eine Hauptkomponentenanalyse implementiert, welche den n-dimensionalen Raum – der durch die Kriterien aufgespannt wird – auf zwei Hauptdimensionen reduziert und damit eine grafische Verdeutlichung der Ergebniszusammensetzung liefert. Diese ist in Abbildung 67 (unten) dargestellt. Die abgebildete Varianz (Δ) gibt an, wie groß der Informationserhalt durch die beiden Hauptkomponenten nach der Reduzierung der Dimension ist. In diesem Beispiel können ca. 23% der Informationen durch die beiden Hauptkomponenten nicht abgebildet werden. Die Theorie zur Hauptkomponentenanalyse (*Principal Component Analysis*) wurden bereits in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Eine dominante Stärke in einem Kriterium wird durch die Ausrichtung des entsprechenden Strahles auf die Alternative verdeutlicht. Die Wichtigkeit des Strahles wird durch seine Länge repräsentiert. Es zeigt sich, dass Alternative 3 dominant in der *Entropie* ist, während Alternative 2 die beste *Update Rate* besitzt. Diese Eigenschaften sind identisch zu den Aussagen, welche aus der Netzdarstellung gezogen werden können. Bei der PCA

wird die Rangfolge durch den orthogonalen Abstand der Alternativen zu dem Entscheidungsstrahl (*Decision Stick*) beschrieben. Dieser ist rot gestrichelt und zeigt die grafische Darstellung der verrechneten Ergebnisse. Es zeigt sich, dass dieser in Richtung Alternative 4 zeigt und sich von Alternative 3 abwendet, was sich mit der ermittelten Rangfolge in Abbildung 66 deckt.

5.4.2 Sensitivitätsanalysen

Jedes Modul der MCDA- Methoden besitzt eine Prozedur namens *getSensitivity*, welche zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse (SA) in der Elternklasse implementiert wurde. Dabei werden die Eingangsvariablen (Gewichtung des gewählten Kriteriums und die Ausprägungen der betrachteten *Elementaren Kriterien*) in vorgegebenen Grenzen variiert und die Auswirkungen auf das SPP betrachtet. Damit kann der Unsicherheit begegnet werden, welche bei der Nachprojektierung von Luftfahrzeugen oder der subjektiven Vergabe der Gewichtungen trotz methodischer Hilfestellung entstehen.

Bei der lokalen SA werden die Gewichtungen und Ausprägungen variiert, um die Robustheit des Ergebnisses hinsichtlich diesen mit Unsicherheiten behafteten Eingangsvariablen zu überprüfen. Dazu wurde eine binäre Suchtechnik implementiert, welche die kritischen Gewichtungen für eine Alternierung der Rangfolge iterativ bestimmt. Dieser *Iterative Binary Search Algorithmus* (ISBA) (Sun 2012) ist weit verbreitet, um einen Zielwert (in diesem Fall eine kritische Gewichtung) in einer sortierten (in der Regel aufsteigend) Folge effizient zu finden (Mehlhorn und Sanders 2008).

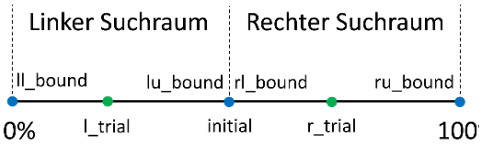


Abbildung 68: Ausgangsbedingung des ISBA (Sun 2012). *Es werden (binäre) Suchräume definiert, in denen sich iterativ an die Ziellösung angenähert wird.*

Die Ausgangsbedingungen sind in Abbildung 68 dargestellt. Der erste Schritt besteht darin, die Anfangsparameter zu definieren. Diese sind die linke untere Grenze (*ll_bound*), die linke obere Grenze (*lu_bound*) sowie die rechte untere (*rl_bound*) und obere (*ru_bound*) Grenze. Danach wird der linke Wert als Mittel für den linken Suchraum (*l_trial*) und der rechte Wert als Mittel für den rechten Suchraum (*r_trial*) berechnet (Sun 2012). Diese Technik vergleicht das mittlere Segment (grüne Punkte in Abbildung 68) mit dem aktuellen Wert und endet bei gleicher Ausprägung der beiden Werte. Wenn der aktuelle Wert kleiner als das mittlere Element ist, eliminiert der Algorithmus die rechte Hälfte der sortierten Sequenz und führt die gleiche Suche nach der linken Seite durch. Wenn der aktuelle Wert größer als das mittlere Element ist, ignoriert der Algorithmus die linke Hälfte der sortierten Sequenz und führt die gleiche Suche nach der rechten Seite durch. Im Flussdiagramm in Abbildung 69 ist *delta* die minimale Änderung der Gewichtung bzw. der Ausprägung der entsprechenden Kriterien. Die Anzahl der Durchläufe bestimmt die Genauigkeit der Berechnung (Mehlhorn und Sanders 2008). Wenn sich die Rangfolge in dem linken Suchraum ändert, wird der linke Testwert (Gewichtung oder Ausprägung) der linken unteren Grenze zugewiesen. Andernfalls werden die Werte an der linken oberen Grenze ausgerichtet.

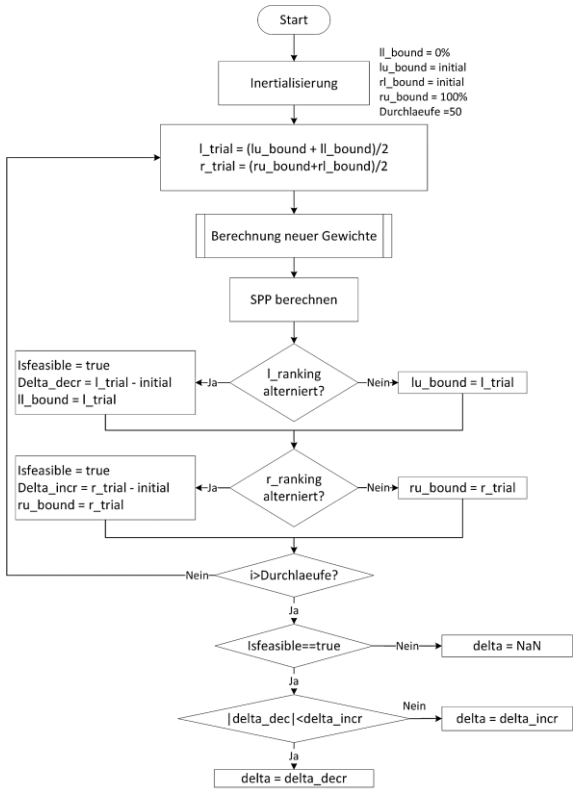


Abbildung 69: Flussdiagramm des ISBA nach (Sun 2012). *l steht für left, u steht für upper. ru steht entsprechend für right upper und ll für left lower.*

Dieses Vorgehen wird äquivalent im rechten Suchraum durchgeführt. Der Algorithmus wird beendet, wenn die Iterationszahl erreicht ist. Wenn schließlich die Entscheidungsvariable wahr ist (*isfeasible*), wird die absolute Größe mit der relativen Größen *delta_decr* und *delta_incr* verglichen. Das kleinere Mengen-Delta ist die minimale Änderung, welche zur Änderung (*delta*) der Rangfolge führt. Ergibt sich kein solches *delta*, kann durch keine Änderung der Gewichtung bzw. Ausprägung die Rangfolge geändert werden.

Ein Ergebnis einer lokalen SA ist in Abbildung 70 dargestellt. Die Variation der Gewichtungen ist auf der Abszisse der linken Grafik und das SPP für das Gesamtergebnis auf der Ordinate aufgetragen. Die gestrichelte Linie markiert die ursprüngliche Gewichtung des Kriteriums. Auf der Ordinate ist das SPP aufgetragen. Der aufgefächerte, farblich hervorgehobene Bereich entsteht durch die Veränderung der berechneten Ausprägungen um ±10%. Die gestrichelte Linie in der Mitte eines jeden Fächers stellt das Ergebnis mit der ursprünglichen Ausprägung dar. Dieses ursprüngliche SPP (bei initialer Gewichtung und Ausprägung) lässt sich ebenfalls in der rechten Abbildung finden. Diese Darstellung der Rangfolge bezieht sich nun nicht auf den Knoten *Leistung* (*Throughput*) wie in Abbildung 66, sondern gilt für das Gesamtergebnis

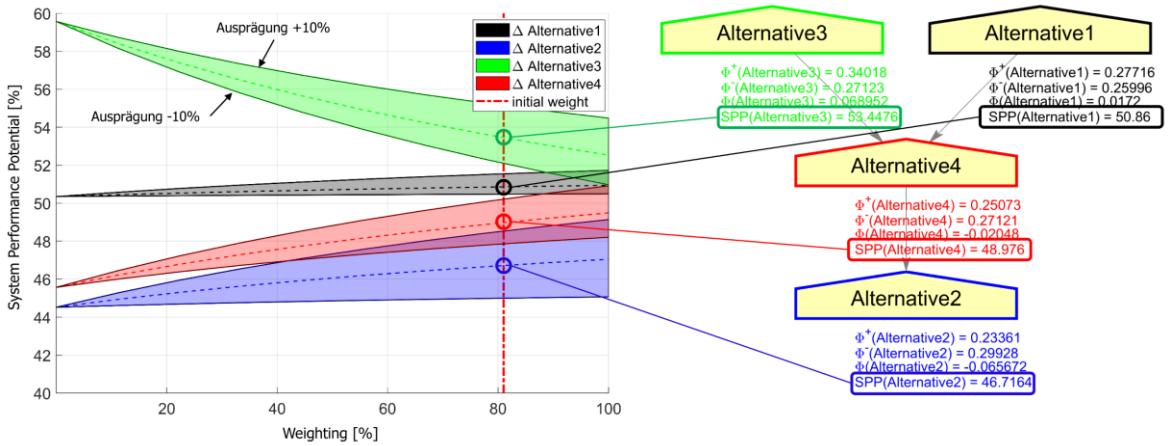


Abbildung 70: Ergebnis der lokalen Sensitivitätsanalyse. *Die Ergebnisse zeigen die Variation des SPP in Abhängigkeit von einer Unsicherheit in der Ausprägung der Elementaren Kriterien von ±10% und einer Variation der Gewichtung.*

(SPP) auf der obersten Ebene. Es zeigt sich, dass eine vergleichbare Eignung zur Missionserfüllung[114] zwischen Alternative 3 und Alternative 1 für das Gesamtergebnis herrscht. Bei einer Reduzierung der Gewichtung fällt das SPP von Alternative 1 stark ab und das SPP von Alternative 3 steigt an, so dass in diesem Fall ein eindeutigeres Ergebnis vorhanden wäre. Die Variation der Ausprägungen zeigt, dass die Ergebnisse eher unsensibel auf die Unsicherheiten sind. Die lokale SA ermöglicht es, die Robustheit des Ergebnisses zu überprüfen und damit ein Vertrauen beim ET zu schaffen. Weiterhin können damit Diskussionen im Entscheidungsprozess effizient (zeit- und kostensparend) gelenkt werden, bspw. auf die sensiblen Parameter der Datenbasis.

Zur weiteren Untersuchung statistischer Abhängigkeiten zwischen den Eingangs (Präferenzinformationen, Ausprägungen)- und Ausgangsvariablen (Systempotential) des Bewertungsprozesses wurde eine globale SA (Sun 2012) implementiert. Dazu wird die Assoziation zwischen zwei Variablen gemessen, welche dann vorliegt, wenn ein Wert einer Variablen Informationen über den wahrscheinlichen Wert der anderen Variablen liefert (Backhaus 2010). Eine Korrelation zwischen den beiden Variablen existiert,

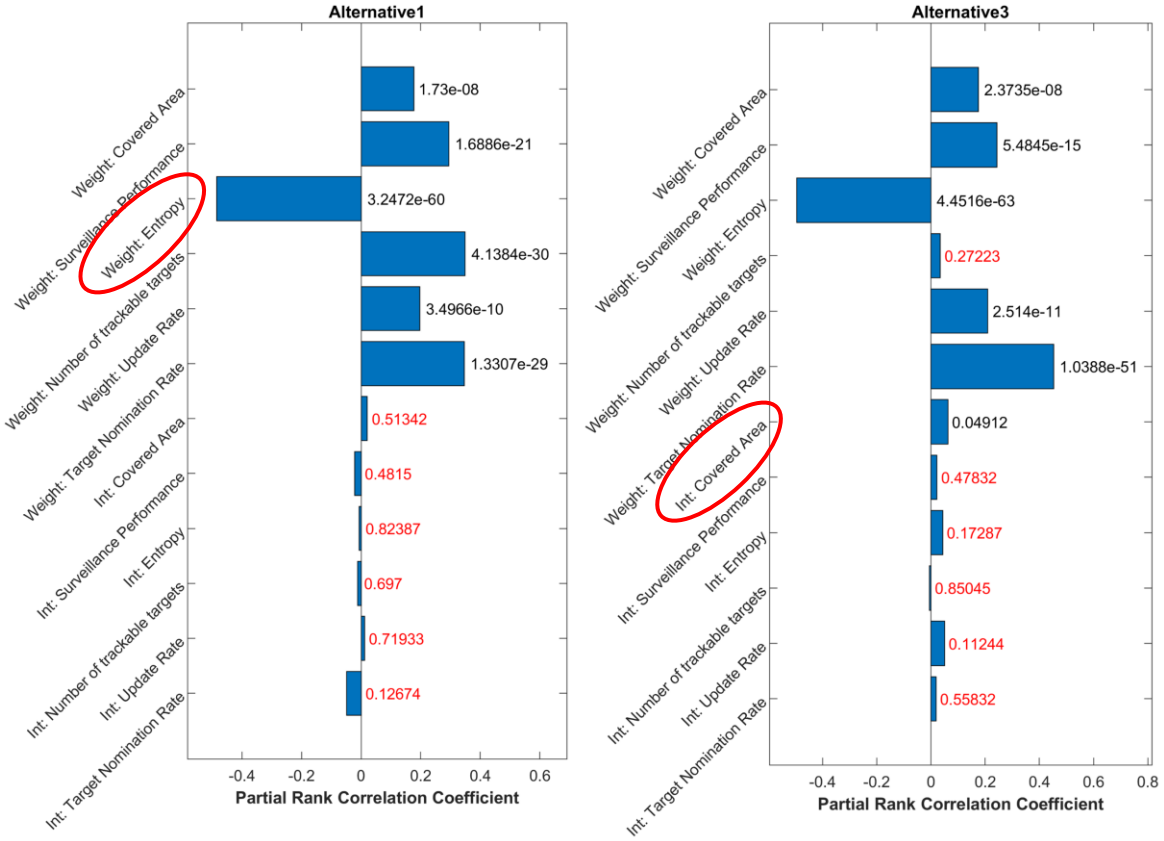


Abbildung 71: Globale SA für Alternative 1 und 3. *Es zeigt sich, dass die Gewichtungen eine große Korrelation mit dem SPP aufweisen, während nur bei Alternative 3 eine Korrelation zwischen dem Kriterium „Covered Area" und dem SPP besteht.*

[114] Zur Berechnung der Partiellen Präordnung werden die Aus- und Eingangsflüsse zu einem Nettofluss verrechnet und gleichzeitig die Unvergleichbarkeiten aus diesen Aus- und Eingangsflüssen berücksichtigt. Daher heißt ein höheres SPP nicht zwingend, dass die Alternative dominiert. Ergeben sich aus Aus- und Eingangsflüssen eine Indifferenz, dann ist eine gleiche Eignung zweier Alternativen trotz höherem SPP einer Alternative möglich (vgl. Abbildung 70). (Brans und Mareschal 2005)

wenn die Assoziation linear ist. Der Rangkorrelationskoeffizient nach *Pearson* wird genutzt, um bei Entscheidungsanalyseprozessen die globale Empfindlichkeit der Rangordnung zu den Eingangsvariablen zu bestimmen. Dabei weist ein höherer Zahlenwert des Koeffizienten auf eine größere Auswirkung bzgl. der Rangfolge hin. Das genaue Vorgehen wurde bereits in Kapitel 4.3.3.2 beschrieben. In Abbildung 71 ist dieser Korrelationskoeffizient für die Kindkriterien der Leistung (*Throughput*) für Alternative 1 und Alternative 3 dargestellt.

Im oberen Teil wird der Einfluss der Gewichtungen und im unteren Teil der Einfluss der Ausprägungen auf das Gesamtergebnis gezeigt. Während bei der lokalen SA nur ein Wert variiert wird und die übrigen konstant gehalten werden, werden bei der globalen SA alle Werte simultan innerhalb der vorgegeben Grenzen variiert. Dazu wurde die Methode des *Latin Hypercube Sampling* (LHS) implementiert (Iman 2008; Sun 2012). Die Balken geben die positive oder negative Korrelation zwischen dem Parameter und dem SPP an. Zur Interpretation dieser Beziehung wurde ein statistischer Signifikanztest in Form des *p*-Wertes realisiert, welcher die Signifikanz der partiellen Rangkorrelation beschreibt. Werte kleiner 0,05 zeigen eine statistische Signifikanz der Korrelation an. Die *p*-Werte ohne statistische Signifikanz sind rot hervorgehoben. Das SPP der beiden Alternativen ist deutlich von der Gewichtung abhängig. Die größte Abhängigkeit für Alternative 1 weißt die Gewichtung der *Entropie* (*Weight: Entropy*, siehe Einkreisung) auf. Während die Ausprägung dieses Kriteriums keine Korrelation mit dem SPP aufweist, kann für Alternative 3 eine Abhängigkeit für die Ausprägung des Kriteriums *Aufgeklärte Fläche* (*Int: Covered Area*, siehe Einkreisung) identifiziert werden.

Damit zeigt sich, dass das SPP deutlich stärker von den Gewichtungen als von den Ausprägungen abhängig ist. Diese Erkenntnisse dienen dem ET, um signifikante Parameter zu identifizieren und ggf. einen detaillierteren Informationsbedarf in diesen Bereichen abzuschätzen. Bei den gezeigten Ergebnissen ist es bspw. wenig sinnvoll, höher entwickelte Berechnungsmodule einzusetzen, um die Ausprägungen detaillierter bestimmen zu können.

5.4.3 Optimierung der Systemparameter

Ausgehend von der bereits vorgestellten Implementierung kann der Ansatz ebenfalls zur Ableitung optimaler Systemparameter genutzt werden. Dazu können die Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* bei sonst gleichbleibender Datenbasis ermittelt werden, bei denen eine bestimmte Alternative zur besten Lösung wird. Dazu wurde die Klasse *Optimizer* erstellt, deren Klassenstruktur im Anhang dargestellt ist.

Mit der Methode *createFramework* (siehe Anhang) wird die Oberfläche zur Auswahl der Optimierungsbereiche für die Kriterien der gewählten Alternative aufgerufen. Diese Oberfläche ist in Abbildung 72 dargestellt. Ausgehend von dem gewählten Elterneintrag werden alle zugehörigen *Elementaren Kriterien* im linken Bereich aufgelistet. Über eine entsprechende Auswahl in Form eines Schiebereglers kann die untere und die obere Grenze für die Optimierung festgelegt werden. Der Bereich ist dabei als prozentuale Abweichung von der initialen Ausprägung angegeben. Die Ausrichtung des Wertebereichs ist abhängig von der entsprechenden Zielfunktion des Kriteriums. Bei einer Minimierung ist der Wertebereich negativ und bei einer Maximierung entsprechend positiv. Neben der Definition eines Wertebereichs kann die

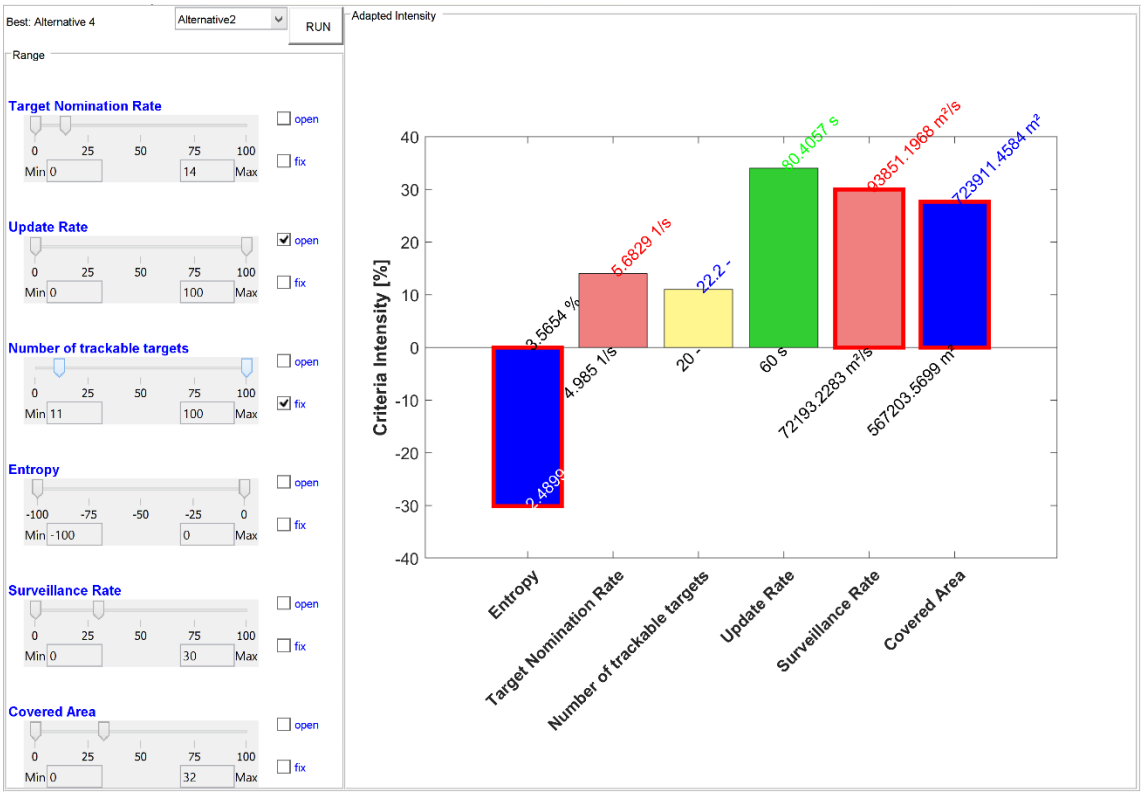


Abbildung 72: Oberfläche zur Ableitung der optimalen Ausprägungen der Elementaren Kriterien. *Auf der linken Seite kann der Wertebereich für die Optimierung festgelegt werden. Weiterhin werden die fixierten oder offenen Bereiche definiert. Auf der rechten Seite ist das Ergebnis der Optimierung dargestellt, während die Farben die entsprechenden Bedingungen für die Optimierung verdeutlichen. Die Verbesserungen sind dabei nur auf das Elternkriterium und nicht auf das gesamte SPP bezogen.*

Ausprägungen auch fixiert werden, wenn keine Verbesserung bspw. durch technologische oder finanzielle Begrenzungen möglich ist. Gleichzeitig kann auch der Wertebereich geöffnet werden, so dass keine Begrenzung besteht.

Mit diesem Vorgehen kann eine ganzheitliche Optimierung vorgenommen werden, so dass nicht jedes Kriterium verbessert werden muss, um eine dominante Alternative zu erhalten. Vielmehr sind einzelne, ausschlaggebende Fähigkeiten zu verbessern, um das Erfüllungspotential zu steigern. So kann es bspw. bei einer Aufklärungsmission in feindlichem Gebiet sinnvoller sein, die Überlebensfähigkeit statt die Missionssensorik zu verbessern oder auch umgekehrt. Mit *RUN* wird die Optimierung anhand der gewählten Wertebereiche durchgeführt. Das Flussdiagramm ist in Abbildung 73 zu sehen. Das implementierte Vorgehen optimiert gleichmäßig über alle ausgewählten Kriterien hinsichtlich deren Wichtigkeit für den Nutzenwert (außer über die fixierten Kriterien), d.h. das wichtigste Kriterium wird als erstes variiert. Dabei erfolgt keine Anpassung der korrelierten Kriterien (stark negative Wechselwirkung, siehe Kapitel 4.2.3.7.2), da diese theoretisch durch entsprechende Modifikationen gleichzeitig optimiert werden können (bspw. kann die *Entropie* verringert und gleichzeitig die *Aufklärungsrate* erhöht werden, wenn bspw. eine höhere *Framerate* erreicht werden kann). Die Verbesserung der einzelnen Ausprägungen erfolgt in infinitesimalen Schritten, wobei nach jedem Schritt erneut das SPP errechnet wird. Dieser Durchlauf wird

solange fortgeführt, bis sich die Rangfolge zugunsten der ausgewählten Alternative geändert hat. Danach werden die notwendigen Anpassungen in der Oberfläche (siehe Abbildung 72) dargestellt.

Die einzelnen Farben der Balken zeigen, welche initialen Bedingungen für die Optimierung gesetzt wurden.

- blau: gesetzter Wertebereich wurde nicht ausgeschöpft, so dass der optimale Wert für dieses Kriterium innerhalb des Wertebereichs liegt
- grün: offener Wertebereich
- rot: Erreichen der maximalen Wertebereichsgrenze
- gelb: Ausprägung wurde fixiert (kann auch auf eine bestimmte Verbesserung fixiert werden, wenn deren Erreichung bereits bekannt ist)

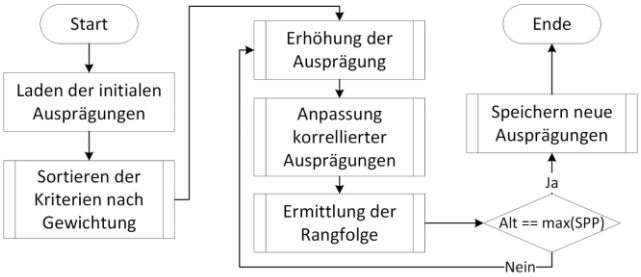


Abbildung 73: Flussdiagramm der Optimierungsrechnung. *Die Optimierung wird solange durchgeführt, bis die betrachtete Alternative die präferierte Lösung darstellt.*

Eine rote Umrandung der Balken verdeutlicht eine Wechselwirkung (aus dem *HoM*, siehe Kapitel 5.2.6). Auf der Ordinate sind die notwendigen prozentualen Verbesserungen aufgetragen. Deren absoluten Werte sind an den Enden der Balken aufgeführt. Die Verbesserungen sind dabei auf das Elternkriterium und nicht auf das gesamte SPP bezogen. Letzteres kann durch eine Verbesserung in dem betrachteten Knoten *Leistung* (vgl. Abbildung 19) nicht erreicht werden, wie bereits schon bei der lokalen SA gezeigt. Die Optimierung kann auch für das gesamte SPP vorgenommen werden, was an dieser Stelle allerdings aufgrund der Übersichtlichkeit nicht gezeigt werden soll.

Mit den Optimierungen können bspw. Bereiche für Modifikationen identifiziert werden, indem auf Basis eines Konkurrenzproduktes[115] die Verbesserung – wie oben gezeigt – ermittelt werden. Diese dienen entweder dazu, bestimmte Fähigkeiten im Rahmen eines *Mid-Life Upgrade*[116] zu verbessern oder Anforderungen für den Entwurf einer Neuentwicklung abzuleiten. Diese Fähigkeit war keine spezielle Anforderung an das DSS, kann allerdings durch dessen Realisierung als weiterer Anwendungsfall (*Use-Case*) abgeleitet werden (siehe Kapitel 2.3.2).

[115] Ein Konkurrenzprodukt kann ein Produkt eines anderen Herstellers oder im militärischen Bereich eine Bedrohung sein, welcher durch neue Fähigkeiten des eigenen Lfz begegnet werden soll.

[116] Ein Mid-Life Upgrade beschreibt ein Programm für den Erhalt oder die Steigerung der Kampfkraft eines militärischen Lfz. Ein solches Programm der finnischen F-18C/D bestand bspw. aus Softwareanpassungen, Waffenintegration und Nachrüstung sowie der notwendigen Logistik: http://www.dsca.mil/sites/default/files/mas/finland_13-31_0.pdf, zuletzt besucht am 21.06.2018

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die prototypische Implementierung von *DESFACE* beschrieben. Diese erfolgte objektorientiert in *Matlab* unter der Nutzung von *Java* Applikationen. Als Schnittstelle zwischen Software und dem ET wurde eine grafische Oberfläche entwickelt, um die Anwendungssoftware mittels Symbolen und Steuerelementen bedienbar zu machen (Anwendbarkeit). Es wurden die Auswahl des Nutzenprofils und anschließend die Ableitung der Inhalte des *HoM* inklusive dessen Implementierung behandelt. Weiterhin wurden die Realisierung der Berechnungsmodule sowie der Aufbau und die Ableitung der Datensätze für die Alternativen als auch die MCDA- Methoden erläutert. Unterschiedliche Darstellungsformen für die Ergebnisse sowie Analysemöglichkeiten wie bspw. Sensitivitätsanalysen und die Möglichkeiten der Optimierung der Ausprägungen wurden ebenfalls umgesetzt.

Zusätzlich wird ein Report des gesamten Bewertungsprozesses automatisiert erstellt, welcher als Dokumentation des Prozesses dient. Dieser enthält die gesamte Datenbasis (ausgewählte Mission, Fähigkeiten, Kriterien, Präferenzen) sowie die Alternativen inklusive deren Ausprägungen und die Analyse der Ergebnisse. Änderungen an der Struktur der Fähigkeiten und Kriterien (hinzufügen, löschen, setzen von Beschränkungen) werden entsprechend kenntlich gemacht. Die Ableitung der Wertvorstellungen (Gewichtung und Präferenzen) erfolgt methodisch unterstützt. Weiterhin können die Konfigurationen der Alternativen inklusive der Kosten definiert werden. Zur Berechnung der nicht korrelierten als auch korrelierten Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* wurde eine Auswahl an Berechnungsmodulen implementiert.

Die Berechnung des SPP für jeden Knoten innerhalb der Hierarchie erfolgt durch Betrachtung der Datenbasis in Verbindung mit den Ausprägungen der *Elementaren Kriterien*. Für die Verrechnung wurden verschiedene MCDA- Methoden implementiert und Anwendungsrichtlinien abgeleitet. Nach der Berechnung können die Ergebnisse für jeden Knotenpunkt in der Struktur individuell angezeigt werden (Abbildung 64 rechts). Für die Analyse der Ergebnisse wurden lokale und globale SA implementiert, mit denen die Robustheit des Ergebnisses überprüft werden kann. Zusätzlich können mit unterschiedlichen Darstellungsformen die Stärken und Schwächen der Alternativen in bestimmten Bereichen als auch weitere Ergebnisdetails angezeigt werden.

Für die Ableitung von optimalen Ausprägungen (bspw. für Anforderungsmanagement, *Requirements Engineering*) wurde weiterführend eine Optimierungsrechnung realisiert. Diese berechnet für eine Alternative die notwendigen Verbesserungen hinsichtlich der Kriterienausprägung, damit diese Alternative die beste Lösung zur Erfüllung der betrachteten Nutzenabsicht wird (höheres SPP als übrige Alternativen). Dabei kann es sich um die Verbesserung in einem Zwischenergebnis (Knoten innerhalb der Kriterien- bzw. Fähigkeitsstruktur) oder im Gesamtergebnis handeln.

6. Evaluierung

In diesem Kapitel wird die Bewertung der Tauglichkeit des entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems *DESFACE* vorgenommen. Dazu wird zu Beginn das Konzept zur Evaluierung[117] vorgestellt und anschließend die Versuchsplanung bzw. -umgebung erläutert sowie die aufgestellten Hypothesen behandelt. Die Ergebnisse werden abschließend dazu genutzt, diese Hypothesen zu bestätigen oder zu falsifizieren.

6.1 Evaluierungskonzept

Angesichts der Tragweite von Auswahlentscheidungen in der Luftfahrt (siehe Kapitel 2.1.2) und der damit verbundenen Verantwortung der ET ist der Nachweis der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik sowie die Richtigkeit der Implementierung von *DESFACE* von erheblicher Bedeutung. In Abbildung 74 sind die drei Komponenten der Modellierung mitsamt der zugehörigen Bereiche für die Evaluation (Verifikation, konzeptionelle und operationelle Validierung) dargestellt. Zu den Komponenten gehören die realen Entscheidungen, welche in Kapitel 2 analysiert wurden. Zur unterstützten Ableitung wurde aufgrund von definierten Anforderungen ein Konzept in Kapitel 4 vorgestellt und in Kapitel 5 als Unterstützungssystem prototypisch implementiert. Dieses DSS wurde zur Unterstützung einer Auswahlentscheidung für Luftfahrzeuge entwickelt und soll an einem fiktiven Anwendungsfall validiert werden.

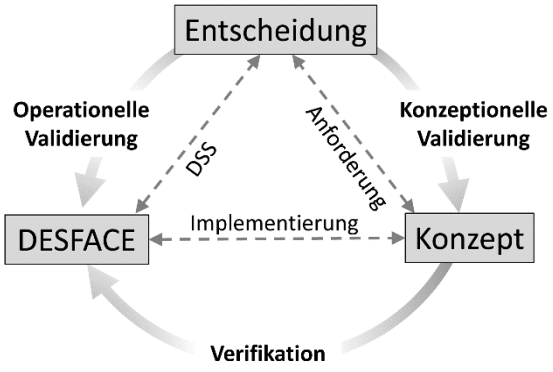


Abbildung 74: Überblick der drei Komponenten des Bewertungskonzeptes. *Bei der Verifizierung wird die Implementierung des Konzeptes überprüft, während bei der Validierung die Korrelation zwischen dem DSS und der Entscheidung erfasst wird.*

Die Verifikation[118] befasst sich nach (Oberkampf 2013) mit der Überprüfung, ob die Modellimplementierung (Datensätze, BM, MCDA) das mathe-

[117] Die Evaluation ist nach (Niegemann 2008) die *„systematische Kontrolle von Qualität, Funktionalität, Wirkung und Nutzen auf Basis systematisch erhobener Daten mit wissenschaftlichen Methoden"*. Eine kritische Betrachtung der Evaluation kann bei (Kromrey 2001) nachgelesen werden.

[118] *„The process of determining that a model implementation accurately represents the developer's conceptual description of the model and the solution of the model."* (Thacker et al. 2004)

matische Modell genau genug repräsentiert[119]. Die Validierung[120] hingegen vergleicht das Modell (DSS) mit der Realität durch Überprüfung der Genauigkeit bzgl. der definierten Genauigkeitsanforderungen (VDI 3633). Daher gliedert sich die Evaluierung des DSS in die beiden unverzichtbaren Bereiche der Verifikation und Validierung (V&V). Dennoch kann damit nicht die vollständige Korrektheit (Validität) nachgewiesen werden (VDI 2008)[121]. Das Ziel von V&V in dieser Arbeit ist daher nicht der Nachweis der Validität, sondern die Bestätigung seiner Glaubwürdigkeit („*Credibility*"). Nach (Carson 1989) ist ein Modell glaubwürdig, wenn es von den ET als hinreichend genau akzeptiert wird, um als Entscheidungshilfe zu dienen. Damit wird der subjektive Charakter des V&V- Begriffs deutlich, welcher auch in dieser Arbeit nicht eliminiert werden kann und soll.

6.1.1 Evaluierungsmethode

Nach (Khazanchi 1991) wäre es paradox, ein DSS hinsichtlich richtiger oder falscher Ergebnisse zu evaluieren. DSS behandeln laut Definition bereits subjektive, unstrukturierte oder nur zum Teil strukturierte, komplexe Probleme, deren Lösungen höchstens als vernünftig (rational), vertrauenswürdig oder nachvollziehbar eingestuft werden können (Mason und Mitroff 1973; Rhee und Rao 2008). Die Einstufung in richtig oder falsch kann ausschließlich durch die Präferenz des ET vorgenommen werden. Nach (Maynard et al. 2001) existieren je nach Anwendungsfall unterschiedliche Evaluationsansätze. Manche sind geeignet für die Bewertung der Nutzbarkeit, während sich andere auf die Qualität bzw. die Leistungsfähigkeit beziehen. Für die Evaluation von *DESFACE* wird daher der 3-Schichtenansatz („*Three-Faceted Evaluation*" Modell) nach (Adelman 1992) genutzt, welcher in die drei Kategorien *technische*, *empirische* und *subjektive* Evaluation eingeteilt wird und dessen betrachtete Aspekte in Tabelle 13 dargestellt sind. Weitere Ansätze können bei (Boukhayma und ElManouar 2015) gefunden werden.

Evaluationsziele (Was wird evaluiert?)

Objektivität der Kriterien	Technische Aspekte	Empirische Aspekte	Subjektive Aspekte
objektiv ↕ subjektiv	- Datensätze - Berechnung - Methoden	- Kosten/Nutzen - Aufwand - Qualität - Vertrauensgrad - Nutzen	- Anwendbarkeit - Interaktion
	Verifikation	Validierung	

Tabelle 13: 3-Schichtenmodell zur Evaluation (angepasst nach (Rhee und Rao 2008) und (Adelman 1992)). *In den drei Phasen werden unterschiedliche sowohl subjektive als auch objektive Kriterien bzw. abhängige Variablen betrachtet. Die Verifikation ist dabei eher objektiv, während die Validierung durch subjektive Einflüsse geprägt ist.*

Die *technische* Evaluation entspricht der Verifikation, während die *empirische* Evaluation die Leistungsfähigkeit des DSS und die Qualität der Entscheidung betrachtet (Validierung). Diese wird nach (Rhee und

[119] Bei der Codeverifikation in der Softwareentwicklung werden bspw. Diskretisierungsfehler, Abbruchfehler und iterative Fehler untersucht, welche in dieser Arbeit trotz der Vielzahl an Quellcode-Zeilen nicht betrachtet werden sollen.

[120] „*The process of determining the degree to which a model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended use of the model.*" (Thacker et al. 2004)

[121] Die Aussage, ein Modell sei „validiert", kann nur bedeuten, dass Aktivitäten der Validierung durchgeführt wurden, sie gibt aber keinen Hinweis über die objektive Gültigkeit des Modells (Rabe et al. 2008).

Rao 2008) meist mit experimentellen Methoden und Befragungstechniken gemessen. Die *subjektive* Evaluation berücksichtigt die Anwendbarkeit des DSS. Es zeigt sich, dass bei der Verifikation ausschließlich objektive Kriterien betrachtet werden, während die Validierung subjektive Einflüsse besitzt. Für die Evaluation von *DESFACE* soll jede Schicht betrachtet werden, welche einzeln für sich unterschiedliche Problemkategorien adressiert, die jedoch für eine ganzheitliche Evaluation des DSS notwendig sind (Rhee und Rao 2008). Zusätzlich werden der Bewertungsprozess, die Ergebnisse und die Anwendbarkeit einzeln berücksichtigt (Forgionne 2017). Die Verifikation wird für unterschiedliche Bereiche des DSS durchgeführt (Datensätze, Berechnungsmodule, MCDA- Methoden), während sich die Validierung auf das gesamte Vorgehen zur Ableitung einer Auswahlentscheidung bezieht.

6.1.2 Hypothesen

Zum Nachweis der Nützlichkeit des DSS und der Methodik werden Hypothesen (z.B. *die Methodik strukturiert das Vorgehen*) aufgestellt, welche im Zuge der Validierung entweder falsifiziert oder bestätigt werden. Bei der Hypothese handelt es sich nach (Hussy und Jain 2002) um eine Vermutung zu einer bestimmten Fragestellung, die als wahrscheinlich angesehen werden kann, jedoch nicht als bewiesen gilt. Diese beziehen sich auf reale Sachverhalte, welche empirisch erfassbar sind. Die dazu genutzten Merkmale können manifester[122] oder latenter[123] Natur sein (Hussy 2010). Weitere Bedingungen für Hypothesen sind bspw. die Falsifizierbarkeit, die Allgemeingültigkeit und die Begründbarkeit (Eid et al. 2015). Das Ziel der Evaluation ist es, die Hypothese mittels eines wissenschaftlichen Nachweises in eine geprüfte Aussage für einen speziellen Anwendungsbereich zu transformieren.

Die in Kapitel 2.3.2 formulierten konzeptionellen Anforderungen zielen auf eine positive Beeinflussung des Prozesses zur Alternativenbewertung durch die Anwendung des entwickelten DSS ab. Zur experimentellen Untersuchung dieser These ist es notwendig, empirisch-inhaltliche Hypothesen abzuleiten, die in Form statistischer Vorhersagen bestätigt bzw. widerlegt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Evaluierung des in Kapitel 4 beschriebenen Konzeptansatzes die folgenden Forschungshypothesen[124] aus den Fragestellungen dieser Arbeit abgeleitet:

1. Das entwickelte DSS ***unterstützt*** den Entscheidungsträger bei einer ***komplexen Bewertungsaufgabe*** luftgestützter Systeme unter Berücksichtigung der ***Nutzenabsicht*** und des damit verbundenen ***Wertesystems***.
2. Das ***strukturierte***, ***methodengestützte*** Vorgehen ***ermöglicht*** die ***effiziente*** Ableitung eines ***transparenten*** und ***reproduzierbaren*** Bewertungsergebnisses inklusive deren ***Analyse***.
3. Der ***fähigkeitsbasierte*** Ansatz ***ermöglicht*** die Ableitung ***optimaler*** Kriterienausprägungen.

---

[122] Ein manifestes Merkmal liegt vor, wenn dieses direkt durch eine Erhebungsmethode erfasst werden kann (Eid et al. 2015). Ein Beispiel ist die Genauigkeit, welche aus einer prozentualen Abweichung ermittelt wird.

[123] Ein latentes Merkmal kann nur indirekt über eine Messgröße abgeleitet werden. Ein Beispiel ist die Überforderung eines Entscheidungsträgers, welche aus ggf. über messbare Leistungsmerkmale abgeleitet werden kann.

[124] Zu den Kriterien für Hypothesen siehe (Henning und Muthig 1979)

Diese Hypothesen sind sehr allgemein formuliert und beziehen sich auf die allgemeinen Konzeptanforderungen (Kapitel 2.3.2). Die in diesem Kapitel durchgeführten experimentellen Untersuchungen dienen dazu, diese Hypothesen zu bestätigen und legitimieren weitere Forschungsaktivitäten im Umfeld der Entscheidungsunterstützung für die Bewertung luftgestützter Systeme. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Evaluierungskonzeptes (Verifikation und Validierung) mit deren Untersuchungsgegenständen (Variablen) genauer behandelt.

6.2 Verifikation

In diesem Abschnitt werden die zugrundeliegenden Daten zur Entscheidungsvorbereitung betrachtet. Dabei soll sich auf die Datensätze der Alternativen, ausgewählte Berechnungsmodule (Kapitel 5.3.1) und die Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie (Kapitel 5.4.1) konzentriert werden. Weitere Bereiche der Datenbasis wie bspw. die Gewichtungen und Präferenzen (siehe Kapitel 4.2.2) werden aufgrund ihres subjektiven Charakters an dieser Stelle für die Verifikation nicht näher betrachtet. Vielmehr sollen im Folgenden verfügbare Referenzdaten genutzt werden, um die objektiven Anteile der zugrundeliegenden Datenbasis des DSS zu verifizieren. Die Richtigkeit der Datensätze ist für eine Bewertung der Luftfahrzeuge essentiell, da diese einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben können, wie später noch verdeutlicht werden soll.

Wie bereits aus Kapitel 2.3.2 bekannt, kann nach (Breiing und Knosala 1997) die *Objektivität*, *Robustheit* und *Plausibilität* zum Vertrauensgrad zusammengefasst werden. Für ein plausibles und objektives Bewertungsergebnis ist es notwendig, dass alle Berechnungsvorschriften und Datensätze korrekt implementiert bzw. verifiziert sind. Andernfalls würde eine Untauglichkeit entstehen, welche bereits in Kapitel 2.3.1 als Grund für Anwendungsprobleme von DSS identifiziert wurde. Aus diesem Grund ist eine Verifikation der Datensätze, der Berechnungsmodule sowie der MCDA- Methoden essentiell, um diese *Plausibilität* und *Objektivität* der Ergebnisse und damit allgemein das Vertrauen in das DSS zu sichern.

6.2.1 Datensätze der Alternativen

Zur Ermittlung der Ausprägungen für die *Elementaren Kriterien* sind neben der Korrektheit der Berechnungsmodule auch die betrachteten Alternativen (Luftfahrzeugvarianten) in Form von Datensätzen entsprechend abzubilden. Zur Generierung dieser Datensätze für Antrieb und Aerodynamik wurden die Lfz nachprojektiert (siehe Kapitel 5.3.1). Weitere Datensätze beschreiben zusätzliche Systeme wie bspw. Sensoren oder zusätzliche Eigenschaften des Systems wie bspw. Kosten. Letztere wurden aus dem Lebenswegkostenmanagement der Bundeswehr (Bundesministerium der Verteidigung 2016) (*Life Cycle Cost Managemen*t, LCCM) abgeleitet.

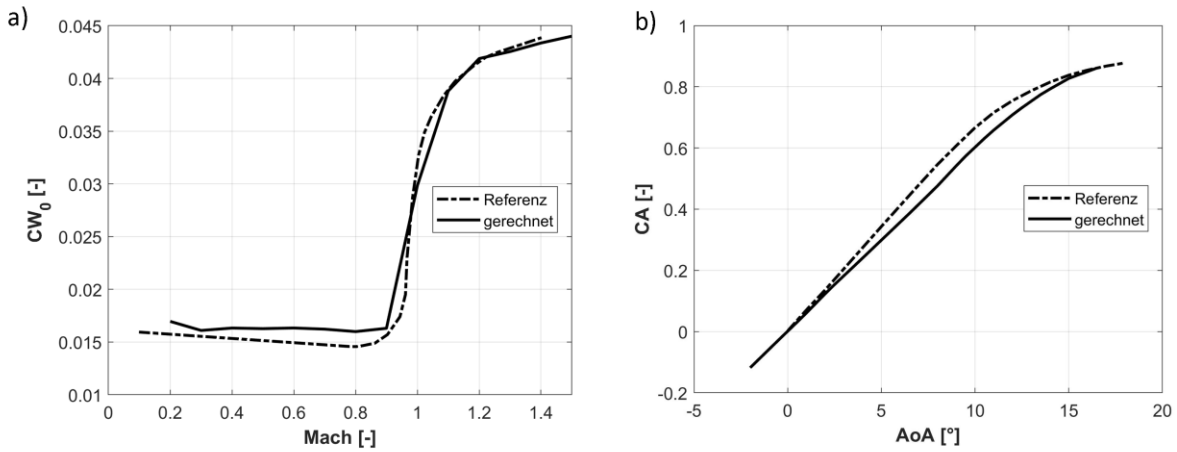


Abbildung 76: links: Nullwiderstandsbeiwert; rechts: Auftriebspolare. *Die Grafik zeigt die Abweichung der nachprojektierten Daten (durchgezogen) mit den Referenzdaten (unterbrochen). Diese stammen aus Flugversuchsdaten der T-38. Es zeigt sich eine geringe Abweichung zwischen dem Nullwiderstandsbeiwert (links) und der Auftriebspolare (rechts).*

Als Referenz für die Verifikation der Datensätze soll der Überschalltrainer T-38[125] dienen, welcher in naher Zukunft durch die Auswahlentscheidung des TX-Programms (Gertler 2017) abgelöst werden soll. Für die Verifikation der Aerodynamik sind Referenzdaten bzgl. des Auftriebs und des schädlichen sowie des induzierten Widerstandes notwendig. Diese wurden aus (Brandt 2015) entnommen und mit den gerechneten Daten verglichen. In Abbildung 76 links ist der Verlauf des Beiwertes für den Nullwiderstand und rechts die Auftriebspolare dargestellt. Die Referenz wird dabei mit der gestrichelten Linie und die gerechneten Daten mit einer durchgezogenen Linie abgebildet. Der Verlauf des Nullwiderstandbeiwertes zeigt ebenso wie die Auftriebspolare kleine Abweichungen, welche allerdings für die Nachprojektierung einer komplexen Aerodynamik mit einem semi-empirischen Verfahren ein gutes Ergebnis darstellen. In den Referenzdaten war keine Polare aufgeführt, so dass der induzierte Widerstand nur in Kombination mit dem Nullwiderstand betrachtet werden kann.

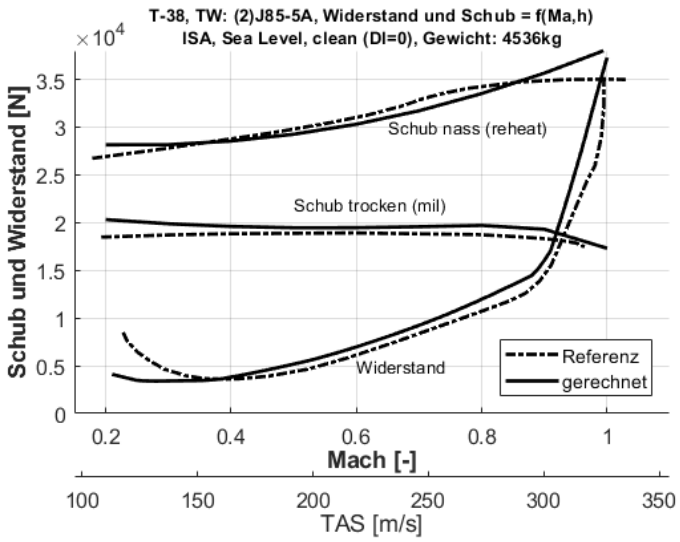


Abbildung 75: Widerstandskurve und Schub. *Diese Darstellung ist eine andere Darstellung der spezifischen Überschussleistung, welche neben Widerstand und Schub zusätzlich die Fluggeschwindigkeit betrachtet und damit die Flugbereichsgrenzen aufzeigt.*

[125] http://www.northropgrumman.com/Capabilities/T38Talon/Pages/default.aspx, zuletzt besucht am 24.08.2018

Der Gesamtwiderstand der T-38 auf Meereshöhe im Unterschall ist in Abbildung 75 aufgetragen. Der Widerstand („Badewannenkurve“) beinhaltet beide Widerstandanteile, sodass die geringe Abweichung des Widerstandes von der Referenz nicht genau durch den Nullwiderstands- oder induzierten Widerstandsanteil begründet werden kann[126]. Der Beiwert für den Nullwiderstand in Abbildung 76 liegt etwas über der Referenz, was auch den erhöhten Gesamtwiderstand erklärt. Neben dem Widerstand sind ebenfalls die Trocken- und Nassschubdaten über der Machzahl aufgetragen. Dabei sind neben den Begrenzungswerten (Drehzahl, Druck, Temperatur) auch Verdichter- und Turbinenkennfelder zu berücksichtigen, was die Nachprojektierung des Triebwerkes aufwändig macht. Die homogenen Verläufe mit den Referenzdaten lassen den Rückschluss auf einen ebenfalls verifizierten Triebwerksdatensatz zu.

6.2.2 Berechnungsmodule für die Kriterienausprägungen

Die einzelnen Datensätze werden fortlaufend genutzt, um daraus relevante Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* zu berechnen. Dazu werden teilweise komplexe Berechnungen vorgenommen, um eine möglichst genaue Ermittlung der Ausprägungen vornehmen zu können. Diese wurden in Berechnungsmodule (Kapitel 5.3.1) implementiert, von denen im Folgenden ein Ausschnitt der Flugleistungen (Turn Chart und Reichweitenrechnung) verifiziert werden soll. Dieser wurde durch die Verfügbarkeit der Referenzdaten vorgegeben.

Punktleistung: Wenderate (*Turn Chart*)

Bei der Manövrierfähigkeit wurde durch Piloten der *Stationären Wenderate (STR)* die größte Bedeutung zugemessen. Neben der STR können weitere Kriterien wie *Instationäre Wenderate (ITR)* oder *minimaler Kurvenradius* von Bedeutung sein. Diese Kriterien können in einem *Turn Chart* wie in Abbildung 77 dargestellt werden. In dieser ist die Wenderate der T-38 über die Geschwindigkeit bei einer Höhe von 15000ft und einer Kraftstoffmasse von 1400 Pfund (635kg) für eine Konfiguration ohne Außenlasten (*clean*) aufgetragen. Die blauen Linien entsprechen konstanten Lastvielfachen und Kurvenradien, welche entsprechend beschriftet sind. Unterhalb der

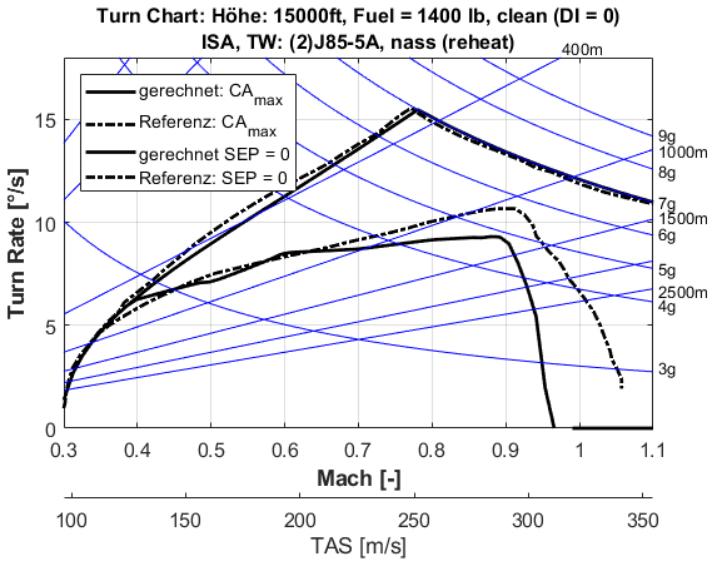


Abbildung 77: Vergleich der Wenderate (Turn Chart). *Es ist die Grenze des maximalen Auftriebsbeiwertes und die stationäre Wenderate (STR) aufgetragen. Im Bereich des maximalen Auftriebsbeiwertes (links der Corner Velocity) zeigen sich kleine Abweichungen zu den Referenzdaten. Trotz dieser marginalen Abweichungen ist das Ergebnis für eine Nachprojektierung ausgesprochen zufriedenstellend.*

[126] Für den induzierten Widerstand gibt es keine eigenen Referenzwerte (bspw. Gesamtpolare)

CV (geringere Geschwindigkeit) wird der Verlauf der ITR durch den maximalen Auftriebsbeiwert sowie den Schub beeinflusst. Oberhalb der CV ist das maximale Lastvielfache der begrenzende Faktor. Es zeigt sich, dass in dem Bereich des maximalen Auftriebsbeiwertes die Verläufe der C_{Amax}- Grenze eine gute Übereinstimmung aufweisen. Die maximale ITR beträgt sowohl bei der Referenz (Brandt 2015) als auch bei der Rechnung 15,5°/s.

Der Verlauf der STR wird sowohl durch die Beiwerte der Aerodynamik als auch durch das Triebwerk beeinflusst. Auf jedem Punkt der geschwindigkeitsabhängigen STR ist ein Kurvenflug mit der entsprechenden Wenderate ohne Energieverlust möglich. Der gerechnete Verlauf zeigt eine geringe Abweichung von der Referenz, welche aufgrund der Vielzahl an Einflüssen und einer gewissen Unsicherheit der Eingangswerte zu erwarten ist. Grundsätzlich ist bei einer Nachprojektierung eines Lfz eine Abweichung zum realen Ergebnis aus Flugversuchen anzunehmen, welche durch Unsicherheiten bzw. Inkonsistenzen bei den Eingangsdaten entsteht. Diese sollten allerdings nicht größer als 10% sein[127]. Dies verdeutlicht die Relevanz einer Sensitivitätsanalyse (SA) zur Überprüfung der Robustheit des Bewertungsergebnisses.

Missionsleistung:

Die Fähigkeit des Lfz Nutzlast wie bspw. Passagiere, Missionssensorik oder Bewaffnung zu transportieren, stellt ebenfalls bei vielen Missionen eine notwendige und damit zu betrachtende Fähigkeit dar. Dabei werden Kriterien wie bspw. die maximale Reichweite oder die Ausdauer (Stehzeit) bei einem bestimmten Missionsprofil ermittelt. Dazu sind ebenfalls die Aerodynamikdaten sowie die Schubdaten und Kraftstoffverbräuche des Triebwerksdatensatzes zu berücksichtigen. Der Vergleich der maximalen Reichweiten beim Flug mit einer vorgegebenen Höhe und Geschwindigkeit (Breguet III)[128] ist in Abbildung 78 dargestellt. Darin sind auf der Ordinate der verfügbare Kraftstoff [kg] und auf der Abszisse die

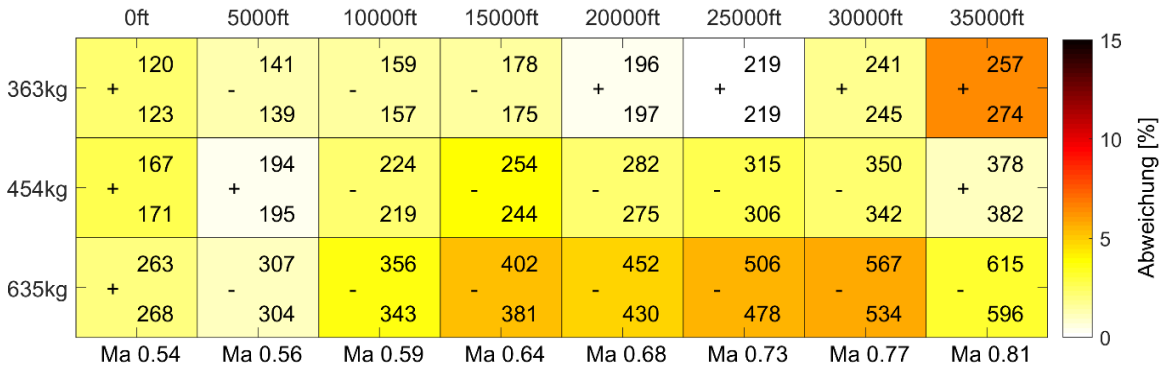


Abbildung 78: Vergleich der Reichweite [km] in Abhängigkeit der Flughöhe [ft], der Geschwindigkeit (Mach) und des Kraftstoffes [kg]. *Es wurde die Reichweite in einer bestimmten Höhe und Geschwindigkeit bei einer Reserve von 136 kg gerechnet. Die gerechneten Werte sind den Referenzwerten (Brandt 2015) in den Zellen gegenübergestellt und die Größenordnung der Abweichung farblich hervorgehoben.*

[127] Die notwendige Genauigkeit der Datensätze hängt von dem schlussendlichen Nutzer der Ergebnisse ab. Ab welcher Abweichung keine *Plausibilität* mehr herrscht und damit der Vertrauensgrad in die Ergebnisse sinkt, ist von jedem ET subjektiv zu bestimmen. Nach Aussage von militärischen Systembewertern sind Abweichungen bis ±10% von realen Ergebnisdaten ein valides Ergebnis.

[128] Vgl. (Stütz 2012)

Flughöhe [ft] (oben) und die entsprechend geflogene Machzahl (unten) aufgetragen. Die Referenzwerte (Brandt 2015) werden durch den oberen Eintrag in den Zellen und die gerechneten Werte durch den unteren Eintrag repräsentiert. Die Vorzeichen geben die Richtung der Abweichung von den Referenzwerten und die Farben die entsprechende prozentuale Größenordnung an. Die Reichweite ist für einen notwendigen Reservekraftstoff von 136kg (300 Pfund) angegeben. Es zeigt sich, dass in allen Bereichen eine Abweichung <10% zu verzeichnen ist. Da ausgewählte Höhen in äquidistanten Abständen aus der Enveloppe der T38 betrachtet werden, müssten die Kennfelder (Verdichter, Turbine) sowie aerodynamischen Beiwerte über nahezu die gesamte Enveloppe exakt sein, um in jedem Bereich eine marginale Abweichung zu erreichen. Dies ist allerdings bei einer Nachprojektierung mit begrenzten Eingangsdaten nicht realisierbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der komplexen Nachprojektierung eines Lfz ein gewisser Fehler unvermeidbar ist, welcher sich allerdings in bestimmten Grenzen bewegen sollte, um eine objektive und genaue Ermittlung der Ausprägung zu gewährleisten. Damit konnten die Berechnungsmethoden aufgrund der geringen Abweichungen zu den Referenzdaten (Flugversuchsdaten) verifiziert werden.

6.2.3 MCDA- Methoden

In diesem Kapitel wird die korrekte Implementierung der MCDA- Methoden überprüft. Dazu werden Beispiele aus der Literatur betrachtet, welche entsprechend als Referenzlösung dienen und nachgerechnet wurden. Nach dieser Verifikation wird zusätzlich ein Abgleich der Ergebnisse einer bereits durchgeführten Auswahlentscheidung mit den berechneten Ergebnissen der MCDA- Methoden durchgeführt. Dabei werden identische Eingabevariablen genutzt. Es wird überprüft, ob gleiche Eingangswerte zu einer identischen Rangfolge mit gleichen Erfüllungspotentialen führen.

6.2.3.1 Verifizierung Anhand von Literaturbeispielen

SAW und NWA:

Für SAW und die NWA (siehe Kapitel 4.3.2.1) wurde ein Beispiel aus (Afshari et al. 2010) nachgerechnet. Bei der NWA wurden lineare Nutzenfunktionen angenommen, so dass für SAW und NWA identische Ergebnisse entstehen sollten (Quadt 2018). Die errechneten Ergebnisse für beide Vorgehen zeigen nur rundungsbedingte Abweichungen von den Referenzergebnissen.

Topsis:

Ein Beispiel aus (Peters und Zelewski 2007) wurde mit der implementierten Methode nachgerechnet. In dem Beispiel werden vier Filialen eines Handelskonzerns anhand von vier Kriterien (Umsatz, Freundlichkeit des Personals, Wartezeiten an der Kasse, Frische der Produkte) mit unterschiedlichen Zielfunktionen miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt. Die

Parameter	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
S^+	0,042	0,042	0,047	0,041
	0,0418	0,0415	0,0456	0,0404
S^-	0,051	0,047	0,033	0,038
	0,0511	0,0465	0,0331	0,0387
C	0,548	0,528	0,413	0,481
	0,5482	0,5285	0,4125	0,4795

Tabelle 14: Ergebnisse für *Topsis* aus (Peters und Zelewski 2007) und gerechnete Werte. *Die Ergebnisse sind in der ersten Zeile und die gerechneten Werte in der zweiten Zeile der jeweiligen Parameter aufgeführt.*

erste Zeile zu den jeweiligen Parametern beschreibt die Referenzwerte, die zweite Zeile beschreibt die berechneten Werte. Es zeigt sich, dass die Werte annähernd identisch sind. Die Abweichungen sind mit der Rundung auf die Nachkommastelle zu begründen.

Promethee:

Für die Verifizierung von *Promethee* wurde ein Beispiel aus (Podvezko und Podviezko 2010) genutzt, welches die Flüsse für verschiedene Präferenzen und Gewichtungen berechnet und damit unterschiedliche Anwendungsfälle abdeckt. So werden bspw. fünf verschiedene Präferenzfunktionen (Podvezko und Podviezko 2010) betrachtet und jeweils die methodenspezifischen Ergebnisgrößen bestimmt. In diesem Beispiel werden verschiedene Länder anhand von fünf Kriterien mit unterschiedlichen Zielfunktionen (Arbeitslosenrate: Minimierung; Bruttosozialprodukt: Maximierung) bewertet. In Tabelle 15 ist ein Ausschnitt der Ergebnisse für die verschiedenen Anwendungsfälle gezeigt. In der oberen Zeile zu jedem Parameter stehen die Werte aus der Referenz und in der Zeile darunter die gerechneten Werte der implementierten MCDA- Module.

	Parameter	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Gewöhnliche Funktion	ϕ^+	1,70	0,92	2,14	1,24
		1,70	0,92	2,14	1,24
	ϕ^-	1,30	2,08	0,86	1,76
		1,30	2,08	0,86	1,76
	ϕ	0,40	-1,16	1,28	-0,52
		0,40	-1,16	1,28	-0,52
Lineare Funktion	ϕ^+	0,924	0,527	1,594	0,952
		0,9238	0,527	1,5939	0,9516
	ϕ^-	0,888	1,367	0,485	1,257
		0,8881	1,3667	0,4848	1,2567
	ϕ	0,036	-0,840	1,109	-0,305
		0,0357	-0,8397	1,1091	-0,3051
Indifferente Funktion	ϕ^+	0,426	0,291	1,348	0,567
		0,4255	0,291	1,3481	0,5665
	ϕ^-	0,438	0,986	0,150	1,058
		0,438	0,9855	0,1498	1,0578
	ϕ	-0,012	-0,695	1,198	-0,491
		-0,0125	-0,6945	1,1983	-0,4913

Tabelle 15: Ergebnisse für *Promethee* aus (Podvezko und Podviezko 2010) und gerechnete Werte. *Die Ergebnisse sind in der ersten Zeile und die gerechneten Werte in der zweiten Zeile der jeweiligen Parameter aufgeführt. Die Abweichungen entstehen ausschließlich durch die Darstellung der Nachkommastellen.*

Die minimalen Abweichungen entstehen ausschließlich durch die Rundung auf die Anzahl der Nachkommastellen, so dass jeder Parameter bei unterschiedlichen Ziel- und Präferenzfunktionen identisch zu der Referenz berechnet werden konnte. Damit kann die mathematische Implementierung von *Promethee* verifiziert werden.

6.2.3.2 Vergleich der Bewertungsergebnisse einer realen Auswahlentscheidung

Nachdem die Methoden verifiziert wurden, soll zur zusätzlichen Überprüfung ein Referenzergebnis einer realen Auswahlentscheidung betrachtet werden. Dieses stellt eine Auswahlentscheidung aus mehreren fliegenden Aufklärungsplattformen dar, welche vertrauliche Daten enthält und deshalb an dieser Stelle nicht näher erläutert wird. Trotzdem soll anhand identischer Eingabewerte das Ergebnis mit Hilfe der implementierten MCDA- Methoden nachgerechnet werden, um bei SAW und NWA[129] ein identisches

[129] Für lineare Nutzenfunktionen

Ergebnis und bei *Topsis* bzw. *Promethee* aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsvorschriften zumindest eine identische Rangfolge zu erhalten.

In der durchgeführten Untersuchung wurden sechs Lösungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der Wertvorstellung der Stakeholder einem operationellen Prüfszenario unterzogen, um deren Eignung festzustellen. Es wurde eine Vielzahl an Kriterien aus einzelnen Forderungsgruppen betrachtet. Dadurch entstand eine Kriterienhierarchie, welche in einzelne Detailstufen gegliedert und für diese ebenfalls Zwischenergebnisse ermittelt wurden. Die Kriterien wurden einzeln gewichtet (Verfahren nicht bekannt) und deren Erfüllung der Forderung auf einer Skala angegeben. Zur Berechnung der Erfüllungswahrscheinlichkeit wurde das *Simple Additive Weighting* Verfahren (SAW) genutzt.

Da die Aufstellung der Gewichtung sowie die Ermittlung der Forderungserfüllung (Ausprägungen) nicht näher erläutert werden kann, sind diese Daten für die Verifikation der MCDA- Methoden als gegeben anzunehmen. Schwerpunkt liegt in der angewandten Methode und vor allem dem erzeugten Ergebnis. Dieses soll mit dem DSS sowohl mit der genutzten SAW Methode als auch mit anderen Methoden nachgerechnet werden.

Die Erfüllungsgrade für die Alternativen der Referenz sind in der zweiten Spalte von Tabelle 16 dargestellt. Nach der Referenzbewertung ergibt sich folgende Rangfolge: A6, A5, A1, A3, A2, A4. Die zugehörigen Erfüllungspotentiale wurden ebenfalls mit SAW des DSS durch Nutzung einer identischen Datenbasis erzielt. Aufgrund der identischen Eingangsdaten kann diese Methode damit verifiziert werden. Für die Ergebnisse der weiteren Methoden (NWA, *Topsis* und *Promethee*) liegen keine Referenzbewertungen vor, so dass die Verifikation nicht direkt durchgeführt werden kann. Dennoch sollen die Ergebnisse mit denen der SAW-Methode verglichen werden, um Rückschlüsse auf die Richtigkeit ableiten zu können.

Alternative	**Referenz (*SAW*)**		***SAW***		***NWA***		***Topsis***		***Promethee***	
1	91,6 %	3	91,6 %	3	91,6 %	3	79,1 %	3	51,3 %	3
2	85,4 %	5	85,4 %	5	85,4 %	5	72,3 %	5	47,6 %	4
3	86,4 %	4	86,4 %	4	86,4 %	4	74,2 %	4	48,2 %	4
4	81,0 %	6	81,0 %	6	81,0 %	6	71,1 %	6	44,9 %	5
5	93,0 %	2	93,0 %	2	93,0 %	2	82,0 %	2	52,2 %	2
6	99,0 %	1	99,0 %	1	99,0 %	1	94,4 %	1	55,7 %	1

Tabelle 16: Vergleich der Ergebnisse einer realen Bewertung und der implementierten Methoden. *In der ersten Spalte sind die Ergebnisse der realen Entscheidung aufgeführt. Die anschließenden Spalten zeigen die berechneten Ergebnisse der MCDA Methoden. Das SPP [%] steht als erstes, danach folgt der Platz in er Rangfolge.*

Es zeigt sich, dass die mit SAW und NWA berechneten Ergebnisse exakt gleich zu den Ergebnissen der realen Entscheidung (Referenz) sind. Für die Ermittlung des Ergebnisses mit NWA und *Promethee* wurden die Präferenzfunktionen als linear angenommen (siehe Kapitel 4.3.2.3). Durch diese linearen Nutzenfunktionen hat NWA eine identische Berechnungsvorschrift zu SAW, weshalb die Ergebnisse der beiden sonst unterschiedlichen Methoden ebenfalls identisch sind (Quadt 2018). *Topsis* und *Promethee*

errechnen eine identische Rangfolge, allerdings mit anderen SPP durch die unterschiedlichen Berechnungsvorschriften[130]. *Promethee* setzt A2 und A3 auf die gleiche Platzierung, da diese Methode – entgegen den übrigen MCDA- Methoden – zusätzlich Unvergleichbarkeiten berücksichtigt, wodurch eine Doppelplatzierung erreicht werden kann (Quadt 2018).

Im nächsten Kapitel erfolgt die Validierung von *DESFACE* anhand einer fiktiven Auswahlentscheidung, welche von Experten durch Nutzung von zwei Vorgehen selbstständig durchgeführt und ein Bewertungsergebnis abgeleitet werden soll. Damit wird die Nützlichkeit von *DESFACE* von erfahrenden Anwendern in einer Experimentalstudie bewertet und abschließend validiert.

6.3 Validierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie sich der Nutzen der entwickelten Methodik sowie des implementierten DSS für reale Entscheidungssituationen ausprägt. Dazu soll im Folgenden die Bewertung von *DESFACE* im Rahmen einer experimentellen Untersuchung an einem Fallbeispiel vorgenommen werden (Produktevaluation). Zunächst ist allerdings anzumerken, dass die Validierung von wissensbasierten DSS von vielen Autoren (Schneider 1994; Brauer et al. 1988) als schwierig erachtet wird. (Kurbel 1989) verweist bei DSS – welche *„Beratungsprobleme"* lösen und damit Unterstützungssysteme darstellen – auf *qualitative* Validierungsverfahren mit folgenden möglichen Vorgehensweisen:

- *Face-Validierung*: kritische Beurteilung des DSS durch Experten,
- *Vorhersage-Validierung*: Prüfung von Testfällen mit bekannten Ergebnissen,
- *Feldtest-Validierung*: Test des DSS in einer realen/realitätsnahen Anwendung,
- *Subsystem-Validierung*: Test einzelner DSS-Komponenten (z.B. Module),
- *Sensitivitäts-Validierung*: Veränderung der Ausgangsgrößen bei Variation der Eingangsgrößen.

Die Validierung von *DESFACE* wurde durch eine Kombination aller o.g. Ansätze durchgeführt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Durchführung einer *Feldtest-Validierung* in einer realitätsnahen – jedoch fiktiven – Entscheidungssituation. Dabei wurde das DSS durch Experten direkt angewendet und gleichzeitig die einzelnen Module (DSS-Komponenten) getestet und bewertet (*Subsystem-Validierung*). Schließlich wurde eine *kritische Beurteilung der* Modellergebnisse für das zugrundeliegende fiktive Anwendungsbeispiel durch Experten vorgenommen (*Face-Validierung* bzw. *Turing-Test* von Experten-

[130] Während die SAW Methode jede Alternative einzeln betrachtet und deren Erfüllung separat berechnet, beziehen die anderen Methoden alle Alternativen in die Berechnung der Erfüllung einer Alternative mit ein. *Topsis* und *Promethee* gibt bspw. einer Alternative einen höheren Vorzugswert, wenn diese als Einzige eine Forderung erfüllt. Ebenso wird eine Alternative mehr „bestraft", wenn diese als Einzige eine Forderung nicht erfüllt. Daraus resultieren andere Erfüllungspotentiale, welche durch das unterschiedliche Vorgehen auch zu erwarten sind. Bei *Promethee* und *Topsis* erhält ausschließlich eine absolut dominante Alternative einen Erfüllungswert von 100%, d.h. diese ist in jedem betrachteten Kriterium allen anderen Alternativen überlegen.

empfehlungen und Modellergebnissen). Eine *Sensitivitäts-Validierung*[131] wurde aufgrund der implementierten Robustheitsprüfung der Ergebnisse in *DESFACE* ebenfalls erfasst. Die *Vorhersage-Validierung* wurde bereits an einem Beispiel im vorherigen Kapitel der Verifikation (Kapitel 6.2) durchgeführt.

6.3.1 Versuchsplanung

Zu Beginn der Versuchsplanung wurden die verschiedenen experimentellen Variablentypen definiert und deren experimentelle Ermittlung thematisiert. Daran anschließend wird die Versuchsumgebung erläutert. Nachfolgend wird die Überprüfung der Hypothesen (konzeptionelle und operationelle Anforderungen) durch sogenannte repräsentative Merkmale thematisiert und abschließend erfolgt die Vorstellung der beteiligten Versuchspersonen (VP) sowie des fiktiven Hintergrunds der Experimente.

6.3.1.1 Experimentelle Ermittlung der Variablen

Die formulierten wissenschaftlichen Hypothesen sind für die experimentelle Evaluierung zu operationalisieren (Döring und Bortz 2016). Je besser diese *abhängigen* Variablen (AV) auf die Kernaussage der Hypothese ausgerichtet sind, desto genauer kann diese bestätigt oder falsifiziert werden. Die bereits dargelegten Hypothesen (Kapitel 6.1.1) lassen sich aufgrund der allgemein gestalteten Formulierungen nur unvollständig durch eine einzelne Variable operationalisieren. Vielmehr sind diese von verschiedenen Gesichtspunkten aus zu betrachten. Dabei können AV bspw. erzielte Leistungen wie die erfolgreiche Durchführung einer Aufgabe oder individuelle Maße wie eine Beanspruchung oder ein Vertrauensgrad sein. Diese AV lassen sich über unterschiedliche Arten von Erhebungsmethoden der psychologischen Forschung ermitteln. Nach (Hussy 2010) sind dies Verfahren des Beobachtens, Zählens und Messens[132], der neurowissenschaftlichen Messungen[133] und des Selbstberichts[134]. In dieser Arbeit lassen sich die AV nicht direkt messen, sondern sind vielmehr über Einschätzung von Experten zu erheben. Wie bereits in Kapitel 2.2.4 beschrieben, ist die Qualität der Entscheidung nicht direkt messbar und hängt in besonderem Maße von den Wertvorstellungen des ET ab. Aus diesem Grund soll letztere Erhebungsmethode für diese Arbeit von besonderer Bedeutung sein (Rhee und Rao 2008).

Diese Verfahren des Selbstberichts lassen sich wiederum in Befragungs- und Ratingverfahren unterteilen. Dabei stellt die Befragung eine allgemeine Grundform der Datenerhebung dar, während das Ratingverfahren eine spezielle Variante der Befragung ist (Hussy 2010). Eine mündliche Form der Befragung zur Datenerhebung (Interview) wird aufgrund der fehlenden Standardisierung durch geschlossene Fragen

---

[131] Die *Sensitivitäts-Validierung* wird auf unterschiedlichen Ebenen der Struktur durchgeführt, so dass diese gleichzeitig eine *Subsystem-Validierung* ist.

[132] Während z. B. die Körpergröße von Personen relativ leicht erfasst werden kann, müssen Gedächtnisprozesse, Intelligenz oder Erfolgsmotivation mithilfe von geeigneten Indikatoren erschlossen werden. Eine Messung erfordert eine hinreichend plausible Theorie, wie solche nicht direkt beobachtbaren psychischen Merkmale überhaupt erfasst werden können. (Hussy 2010)

[133] Bspw. über elektrodermale Aktivität, Elektromyogramm, Eyetracker, Messung im Herz-Kreislauf-System, EEG, MEG, bildgebende Verfahren (Computertomografie, Röntgen, MRT)

[134] Weitere Erhebungsmethoden für die Messwerterfassung können bspw. bei (Bortz und Döring 2015) und (Sedlmeier und Renkewitz 2013) nachgelesen werden.

mit vorgegebenen Antworten (Ratings) an dieser Stelle nicht weiter verfolgt. Vielmehr stellt die schriftliche Befragung in Form von Fragebögen zur Erhebung der quantitativen Informationen die beste Möglichkeit dar, um eine Bewertung des entwickelten DSS abzuleiten.

Die Konstruktion schriftlicher Befragungen erfordert mehr Vorwissen über den Untersuchungsgegenstand als eine offene mündliche Befragung; zudem ist bei schriftlichen Befragungen das Reaktivitätsproblem[135] geringer. Speziell beim *Ratingverfahren* können direkt quantitative Daten auf einem Intervallskalenniveau erzeugt werden, wodurch dieses Verfahren im Folgenden Anwendung finden soll. (Hussy 2010) hat Richtlinien für die Aufstellung von Fragebögen mit Ratingverfahren formuliert, welche in dieser Arbeit berücksichtigt wurden, jedoch an dieser Stelle nicht detailliert erläutert werden sollen.

6.3.1.2 Unabhängige Variablen: Versuchsumgebungen

Nach (Schopphoven 1996) ist eine Beurteilung der Qualität eines Objektes nur möglich, wenn ein zweites Objekt zum Vergleich existiert. Das isolierte Objekt kann in seiner Qualität nur beschrieben, allerdings nicht beurteilt werden. Als Objekt soll nun das Vorgehen zur Ableitung einer Bewertung bzw. Entscheidung verstanden werden, welches damit eine *unabhängige* Variable (UV) darstellt. Daher wird zur Bewertung der zur Verfügung stehenden luftgestützten Systeme eine Vergleichsstudie mit *zwei* unterschiedlichen Bewertungskonfigurationen durchgeführt und die Auswirkungen der *unabhängigen* auf die *abhängigen* Variablen eruiert. Die erste Konfiguration stellt ein aktuell genutztes Vorgehen dar, dessen Ergebnisse bereits bei der Verifizierung in Kapitel 6.2.3.2 als Referenz dienten. Die zweite Konfiguration

Fähigkeiten	Referenzvorgehen	*DESFACE*
Fähigkeitsorientierte Ableitung der Kriterien	×	✓
Beteiligung von Fachexperten	✓	✓
Methodische Ableitung der Gewichtungsverteilung	×	✓
Definition eines Wertesystems (mit Präferenzen)	×	✓
Berücksichtigung von Indifferenzen	×	✓
Methodische Ableitung des Ergebnisses	✓	✓
Auswahl der MCDA Methode	×	✓
Grafische Darstellung der (Zwischen)Ergebnisse	×	✓
Untersuchung der Ergebnisse	×	✓

Tabelle 17: Gegenüberstellung der Fähigkeiten beider Bewertungsvorgehen. *Das Referenzvorgehen sowie DESFACE wurden implementiert und sequentiell in dem betrachteten Anwendungsfall durch die Versuchspersonen angewandt.*

[135] Reaktivität bei psychologischen Datenerhebungen bedeutet die Veränderung bzw. Verzerrung der erhobenen Daten alleine aufgrund der Kenntnis der untersuchten Personen darüber, dass sie Gegenstand einer Untersuchung sind. Aufgrund von Reaktivität verändert sich die Beschaffenheit des zu erforschenden Gegenstands in der Psychologie des menschlichen Erlebens bzw. psychischer Vorgange (Hussy 2010).

ist *DESFACE*. Eine Gegenüberstellung beider Bewertungsvorgehen ist in Tabelle 17 dargestellt. Damit liegt für die Validierung eine zweifachgestufte *unabhängige* Variable vor (Referenzvorgehen und *DESFACE*), welche das Bewertungsergebnis sowie die Charakteristika der Vorgehen als *abhängige* Variable vorhersagen soll.

Das Referenzvorgehen kann als eines der aktuellen Standards bei planenden militärischen Dienststellen zur Unterstützung von Auswahlentscheidungen verstanden werden. Dabei werden ausgehend von den gemachten Forderungen an die Systeme (*Requirements*) Erfüllungsgrade ermittelt und eine einfache Methode der multikriteriellen Entscheidungstheorie genutzt, um den gesamten Erfüllungsgrad der betrachteten Systeme zu berechnen. Die Ergebnisse werden stets auf die aufgestellten Forderungen – bestehend aus einem Kriterium und einer zugehörigen Ausprägung – bezogen, wobei speziell die Ausprägung nicht immer bekannt ist und damit zu Verfälschungen führen kann (Weck et al. 2012).

6.3.1.3 Abhängige Variablen: Validierungskriterien

Die Überprüfung der formulierten Forschungshypothesen findet anhand repräsentativer Merkmale statt. Diese sind empirisch erfassbare Größen von Untersuchungsobjekten (Versuchspersonen), welche zur Feststellung von Gleichheiten oder Unterschieden zwischen den Untersuchungsobjekten dienen (Eid et al. 2015). Zur besseren Beschreibung dieser Merkmalsunterschiede wird in der empirischen Forschung der Begriff der Variable[136] genutzt (Döring und Bortz 2016). In einer experimentellen Untersuchung können somit die *unabhängigen* Variablen von einem Versuchsleiter variiert werden (bspw. veränderte Vorgehen, Umweltbedingungen, Systemausfälle), wodurch deren Einfluss auf die *abhängigen* Variablen erfasst werden kann. Unerwünschte Einflüsse auf die *abhängigen* Variablen können durch sogenannte *Störvariablen* repräsentiert werden. Diese können bspw. Beleuchtung, Uhrzeit, Lärmpegel oder Erfahrung sein. Für genauere Erläuterungen zu den *unabhängigen* und den *Störvariablen* sei an der dieser Stelle auf (Hussy 2010) verwiesen.

Für die folgende Validierung werden *abhängige* Variablen erhoben, welche sich in die Bereiche *Qualität*, *Aufwand* und *Anwendbarkeit* aufteilen lassen, woraus sich ein multivariates Design aus konzeptionellen und operationellen Anteilen ergibt.

Personenbezogene Daten:
Die Erfassung der personenbezogenen Daten zu jeder VP sowie deren Erfahrung im Bereich der Systembewertung/-auswahl und Einstellung zu DSS fand vor Beginn der experimentellen Untersuchungen statt. Darüber hinaus wurde die persönliche Einstellung zu der Notwendigkeit eines ganzheitlichen Vorgehens erfasst sowie die Einstellung bzgl. des Verantwortungsbewusstseins bei Entscheidungen erfragt.

Bei einem Bewertungsergebnis handelt es sich stets um eine auf das Wertesystem des ET ausgerichtete Lösung eines Auswahlproblems, welche bei einem anderen ET möglicherweise eine andere Gestalt annehmen kann. Zwar wird in dieser Arbeit durch das Einbeziehen von Fachleuten versucht, dieses Wertesystem zu objektivieren und eine allgemeingültige Bewertung abzuleiten, dennoch existieren keine

[136] *"Eine Variable ist ein Symbol für die Menge der Ausprägungen eines Merkmales."* (Hussy 2010)

objektiven Musterlösungen in Form von Referenzergebnissen. Aus diesem Grund ist die Erfassung von Leistungsmaßen wie bspw. Bewertungserfolg oder *„richtige“* Bewertung aufgrund einer fehlenden Referenz nicht zielführend und auch nicht möglich (Khazanchi 1991). Vielmehr ist der Nutzen für das Referenzvorgehen und *DESFACE* zu quantifizieren, um anschließend eine Differenz in Form einer Verbesserung bzw. Verschlechterung ableiten zu können.

Die AV zur konzeptionellen Bewertung der Verbesserung im Bereich der *Qualität* (Leistungsfähigkeit) werden aus den einzelnen Punkten der Konzeptanforderungen dieser Arbeit (Kapitel 2.3.2) abgeleitet. Die adressierten allgemeinen Anforderungen sind vor den AV in Klammern aufgeführt. Diese sind im Einzelnen:

***(A1) Missionsorientierung*:**
Zur Bestimmung der Genauigkeit (Akkuratesse[137]) von Bewertungen bzw. Entscheidungen wurden bei (Schopphoven 1996) relevante Arbeiten zusammengetragen[138]. (Johnson und Payne 1985) schlagen vor, unterschiedliche Entscheidungsergebnisse und deren Zusammensetzung von Experten beurteilen zu lassen. Von den Experten ist eine Einschätzung darüber abzugeben, wie genau die zugrundeliegende Nutzenabsicht und die Präferenzen berücksichtigt worden und wie sich daraus das Ergebnis ableitet.

***(A2) Transparenz*:**
Generell ist die steigende Anzahl der betrachteten Kriterien nicht förderlich für die Transparenz des Bewertungsprozesses (Rohr 2004). Allerdings ist bei einer komplexen Bewertung – wie in dieser Arbeit durchzuführen – die Reduktion der Kriterien aufgrund des ganzheitlichen Ansatzes ausgeschlossen. Der Begriff der *Transparenz* bezieht sich im Folgenden auf die Datenbasis des Bewertungsprozesses. Dabei wird betrachtet, ob die zugrundeliegenden Daten dem ET bei Bedarf zugänglich gemacht werden und lückenlos dargestellt sind.

***(A3) Nachvollziehbarkeit*:**
Eine ausreichende *Reliabilität*, d.h. eine zufriedenstellende *Nachvollziehbarkeit*[139] der Bewertungsergebnisse, ist eine Grundvoraussetzung für die Nutzung eines DSS. Diese wird dabei in zwei Bereiche gegliedert. Der erste Bereich beinhaltet die Transparenz des instrumentellen Rahmens des DSS (siehe *(A2) Transparenz*), welcher sich auf das Modell und das Verfahren bezieht. Der zweite Bereich bezieht sich auf die Ergebnisse, dabei besonders auf deren Ermittlung und Darstellung. Bei der Darstellung wird betrachtet, wie die komplexe Zusammensetzung des Erfüllungspotentials (SPP) dem ET präsentiert wird und wie dieser die Vor- und Nachteile der betrachteten Alternativen übermittelt bekommt. Die *Nachvollziehbarkeit* bezieht sich dabei auf die Rückverfolgbarkeit der Ergebniszusammensetzung.

---

[137] Der Begriff „Akkuratesse“ wird mit Exaktheit oder Richtigkeit gleichgesetzt.
[138] Während (Jacoby et al. 1974) die Übereinstimmung zwischen der gewählten Alternative mit einem individuellen Idealprodukt untersucht, betrachtet (Shields 1983) die Übereinstimmung zwischen einem Expertenurteil und dem von Probanden getroffenen Urteil.
[139] Nachvollziehbarkeit ist nicht mit Reproduzierbarkeit gleichzusetzen. Die Reproduzierbarkeit oder Replizierbarkeit bedeutet die Wiederholbarkeit von empirisch-wissenschaftlichen Ergebnissen.

***Vertrauensgrad*:**
Nach (Schopphoven 1996) ist Entscheidungsqualität das Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten sowie *„das Ausmaß, mit dem eine Entscheidung in Ergebnis und Prozessablauf der individuellen Präferenzstruktur des Entscheiders entspricht.“* Daher ist zu prüfen, inwieweit der ET seine Präferenzen abgebildet und das entsprechende Ergebnis drauf ausgerichtet sieht. Der Vertrauensgrad bezieht sich dabei auf das gesamte Vorgehen der Entscheidungsunterstützung. Allerdings ist das Vertrauen in eine Entscheidung keine messbare oder berechenbare Größe (Breiing und Knosala 1997). Durch den subjektiven Charakter der Bewertung bzw. Entscheidung ist auch das entgegengebrachte Vertrauen subjektiv. Nach (Breiing und Knosala 1997) hängt der Vertrauensgrad von der *Objektivität*, *Plausibilität* und *Robustheit* ab.

(A4) Robustheit: Aufgrund der subjektiven Eingangsparameter ist die *Sensibilität* des Ergebnisses ebenfalls entscheidend für den Vertrauensgrad. Diese lässt sich berechnen, so dass der ET damit eine direkte Beurteilung vornehmen kann.

(A5) Objektivität: Die pauschale Frage, ob die Bewertung objektiv ist, kann zunächst aufgrund der subjektiven Einflüsse (Kapitel 2.2.3) nur mit *„Nein“* beantwortet werden. Daher ist nicht eine absolute *Objektivität*, sondern eine entsprechende Erhöhung ebendieser zu erfassen. Erfasst werden Informationen bzgl. *quantifizierbarer Kriterien*, *subjektiver Einflussnahme* und der *Ergebnisanalyse*.

(A2+A3) Plausibilität: Wichtig für die Akzeptanz des DSS ist, ob der ET den generierten Ergebnissen vertraut und ob diese für ihn sinnvoll bzw. nachvollziehbar erscheinen. Dabei kann sich *Plausibilität* auch erst durch die Darstellung der Ergebnisse und einer durchgeführten Ergebnisanalyse einstellen. Grundlage für die *Plausibilität* ist die Anwendung von verifizierten Modulen (siehe Kapitel 6.2).

Für die operationelle Validierung werden als AV die *Anwendbarkeit* und der *Aufwand* betrachtet:

Anwendbarkeit:
Nach jedem durchgeführten Modul des DSS (Auswahl der Nutzenabsicht, Definition des Wertesystems, MCDA Anwendung, Ergebnisdarstellung) werden Aussagen seitens der VP zu den beiden Vorgehen über Fragebögen aufgenommen. Hierbei ist das primäre Ziel, die grundlegende Gebrauchstauglichkeit (*Usability*)[140] der implementierten Module festzustellen und die allgemeine Nutzungsmöglichkeit zu eruieren. Dazu werden ebenfalls objektiv die Interaktionen des Benutzers mit dem Programm gemessen.

Aufwand/Ressourcen:
Ein weiteres mögliches Maß stellt der zeitliche Bedarf dar, welcher bei beiden Vorgehen erfasst wird. Dieser lässt allerdings keine Aussage über die *Tauglichkeit* des DSS zu, da die zeitliche Komponente bei einer komplexen Systembewertung nicht kritisch ist. Daher scheint es angezeigt, das Verhältnis zwischen

[140] In den Bereichen des multimedialen Lernens bezieht sich die *Usability* ausschließlich auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Niegemann 2008). In dieser Arbeit soll *Usability* allerdings als ganzheitliche Anwendbarkeit verstanden werden, welche nicht nur die Gestaltung des Layouts, die Benutzerfreundlichkeit oder programmtechnische Aspekte (vgl. Softwareergonomie) charakterisiert.

Zeitbedarf und entstehenden Nutzen (Effizienz) als Maß für die *Tauglichkeit* heranzuziehen. Dennoch soll der Aufwand neben einer subjektiven Einschätzung auch objektiv ermittelt werden, indem bspw. die benötigten Zeiten zur Bearbeitung der Module erfasst werden.

Nach (Ascough et al. 1997) wird eine Nutzerakzeptanz vor allem durch die wahrgenommene *Nützlichkeit* bzw. *Qualität* des DSS, aber auch durch dessen Benutzerfreundlichkeit bzw. *Anwendbarkeit* bestimmt. Damit soll die abschließende *Akzeptanz* aus den Ergebnissen der konzeptionellen *Qualität* und der operationellen *Anwendbarkeit* abgeleitet werden.

Diese vorgestellten Punkte werden in Fragebögen berücksichtigt, welche durch die VP auszufüllen sind. Dabei werden zu jedem Punkt mehrere Fragen (*Items*[141]) formuliert. Mit relativen Fragen wird zusätzlich eine direkte Verbesserung in Bezug zum Referenzvorgehen ermittelt und die Konsistenz mit der absoluten Bewertung überprüft. Eine klassische Form von Ratingverfahren ist das *Semantische Differenzial*, welches von (Osgood 1975) erstmals vorgestellt wurde. Durch Antworten auf mehreren bipolaren *Items* entsteht ein Polaritätsprofil, das die *„mentale Repräsentation des beurteilten Objekts in seinen wesentlichen Merkmalen anschaulich wiedergeben soll"* (Hussy 2010). Damit können die VP ihre affektive Einstellung bzgl. der beiden Vorgehen auf einer mehrstufigen, bipolaren Skala beurteilen. Ausgehend davon werden die linguistischen Ausprägungen auf eine Verhältnisskala transformiert, wodurch abschließend beide Vorgehen direkt verglichen werden können. Dazu wird der Fragebogen als standardisierte Evaluationsmethode genutzt[142]. Die Gütekriterien für die *Items* nach (Hollenberg 2016) wurden entsprechend berücksichtigt. Die Fragebögen sind *„logisch konsistent sowie intersubjektiv nachvollziehbar (Objektivität)"* (Hollenberg 2016). Die Validität beschreibt die Abdeckung des Fragebogens hinsichtlich der definierten AV (Schnell et al. 2014).

Diese Abdeckung durch entsprechende *Items* der Fragebögen ist in Tabelle 18 dargestellt. Die einzelnen Fragen sind fortlaufend nach Teilbereichen gegliedert, welche dem Ablauf eines Bewertungsprozesses entsprechen und nach denen sich die Vorstellung der experimentellen Ergebnisse in Kapitel 6.3.3 richtet. Der Bezug der Fragen zu den einzelnen AV wird mit einem „x" gekennzeichnet. Bei Fragen mit einem *Semantischen Differential* beziehen sich die *Items* meist auf mehrere AV, was durch eine entsprechende Zahl kenntlich gemacht wurde. Es ist zu erkennen, dass alle AV zu annähernd gleichen Teilen berücksichtigt werden. Die größere Abdeckung beim *Vertrauensgrad* entsteht durch die Wechselwirkung zwischen *Plausibilität*, *Robustheit* und *Objektivität*, welche einzeln erfasst werden und damit aggregiert zu einer größeren Abdeckung in diesem Bereich führen. Als objektives Maß für den Aufwand werden die Interaktionen mit dem Programm sowie die benötigten Zeiten für die einzelnen Prozesse ermittelt, wodurch die geringere Abdeckung mit objektiv ermittelten Maßen ergänzt und damit legitimiert wird.

---

[141] Ein Item ist eine als Frage oder als Urteil formulierte Aussage, zu welcher die befragte Person ihre Zustimmung oder Ablehnung – ggf. in unterschiedlicher Intensität – äußern kann.

[142] Weitere Evaluationsmethoden neben der schriftlichen Befragung sind bspw. die mündliche Befragung, die Beobachtung, das Verhaltensrecording oder Tests.

	Kriterienstruktur								Präferenzen								
Frage	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Missionsorientierung							x	x		x				x			4
Transparenz																	0
Nachvollziehbarkeit	x	x	x			x	x	x	x			2				2	11
Vertrauensgrad	x			x		2	x					x	x			x	8
Anwendbarkeit			x		x	x		x	x		x	2			x	3	12
Aufwand																	0

	Datenbasis								Ergebnis + Analyse							
Frage	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
Missionsorientierung	x			x	x		x		x			x			3	9
Transparenz	x									x	x	x	x	x	2	8
Nachvollziehbarkeit			x	2				x		x						5
Vertrauensgrad	x		x	x	x	x							x	x	x	8
Anwendbarkeit		x		x											x	3
Aufwand																0

	Gesamtbeurteilung (absolut)																
Frage	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	
Missionsorientierung	x										x				x		3
Transparenz	2						x										3
Nachvollziehbarkeit	1						x										2
Vertrauensgrad	4	x	x		x	x					x				x		10
Anwendbarkeit	4			x	x	x			x	x	x	x	5	x		x	18
Aufwand								x									1

	Gesamtbeurteilung (relativ)										Aufwand							
Frage	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80		
Missionsorientierung			x		x				2				x				5	**21**
Transparenz		x				x		x	2								5	**16**
Nachvollziehbarkeit								x	x								2	**20**
Vertrauensgrad	x				x	x			2	2							7	**33**
Anwendbarkeit	4			x			x			x	x						8	**41**
Aufwand											2	x	x	x	x	x	7	**8**

Tabelle 18: Abdeckung der Items des Fragebogens mit den *abhängigen* Variablen. *Die Kennzeichnung der Fragen entspricht den einzelnen Prozessen (Schritten) zur Ableitung einer Auswahlentscheidung und damit auch der Versuchsdurchführung, welche im nächsten Kapitel genauer beschrieben wird. Der Fragebogen ist hinsichtlich diesen Schritten getrennt, so dass nach jeder „Sequenz" der entsprechende Teil des Fragebogens direkt ausgefüllt werden kann, um eine unverfälschte Bewertung ableiten zu können. Der Aufwand wird zusätzlich noch objektiv ermittelt, weshalb eine geringere Abdeckung im Fragebogen zulässig ist.*

6.3.1.4 Versuchspersonen

Für die experimentelle *Fremd-Validierung*[143] standen Experten bzw. Versuchspersonen (VP) mit langjähriger Erfahrung (Ø 5,1 Jahre) bei der Bewertung und Auswahl von luftgestütztes Systemen zur Verfügung. Diese VP waren Stabsoffiziere der Bundeswehr und Bewerter im gehobenen bzw. höheren technischen Dienst. Ein genauer Überblick über die Erfahrungen der teilnehmenden VP kann Tabelle 19 entnommen werden.

Alle VP verfügten über das notwendige Grundlagen- sowie ausgeprägtes Spezialwissen, um die Experimente durchzuführen. Die Teilnahme an den Experimenten erfolgte auf freiwilliger Basis ohne Aufwandsentschädigung. Durch die breite Abdeckung des Anwenderbereichs mit unterschiedlich erfahrenen Experten aus verschiedenen Aufgabenbereichen sind die abschließenden Ergebnisse der Validierung auf die gesamte Zielgruppe (militärische und zivile ET) generalisierbar, für welche eine Aussage (Hypothesen) getroffen wird (Repräsentativität[144]).

VP	Tätigkeitsfeld	Systeme	Erfahrung [y]	Bereich
1	Bedrohungsanalyse	Hubschrauber, UAV	3	mil
2	Bedrohungsanalyse	sonstige	1	mil
3	Bedrohungsanalyse	UAV	1	mil
4	Bedrohungsanalyse	Kampfflugzeuge, UAV	4	ziv/mil
5	Bedrohungsanalyse	Kampfflugzeuge	12	mil
6	Beschaffung	Kampfflugzeuge	1	mil
7	Beschaffung	Kampfflugzeuge, UAV	15	mil
8	Beschaffung	Kampfflugzeuge, UAV	4	mil

Tabelle 19: Angaben zur Erfahrung der Testpersonen. *Die Aufstellung gibt einen Überblick bzgl. der Erfahrung und des Tätigkeitsbereiches der Testpersonen. Die durchschnittliche Erfahrung beträgt 5,1 Jahre.*

Nach (Kromrey 2001) gibt es zwei unterschiedliche Arten zur Durchführung von Experimenten. Bei dem *Between- Subjects- Design* (einmalige Messung) existieren zwei Gruppen, wobei eine Gruppe die Kontrollgruppe und die andere die Experimentalgruppe darstellt. In beiden Gruppen werden die Ausprägungen der *abhängigen* Variablen (siehe Kapitel 6.3.1.1) gemessen und verglichen. Eine zweite Möglichkeit ist das *Within- Subjects- Design* (wiederholte Messung), bei welchem jede VP beide Versuchskonfigurationen durchläuft. Beide Möglichkeiten besitzen Stärken und Schwächen, wodurch die Auswahl von dem Untersuchungsgegenstand abhängt (Field 2015). Aufgrund der limitierten Anzahl an repräsentativen VP wurde in dieser Arbeit das *Within- Subjects- Design* verwendet (Charness et al. 2012). Nach (Field 2015) sollte auch – wenn immer möglich – das *Within- Subjects- Design* genutzt werden. Neben der geringeren Probandenzahl hat dieses Vorgehen weiterhin den Vorteil, dass alle Störvariablen der Probanden optimal in den Versuchskonfigurationen parallelisiert sind und damit keinen Einfluss auf das Ergebnis haben (Sedlmeier und Renkewitz 2013).

---

[143] Bei der Fremdvalidierung ist im Gegensatz zur Selbstvalidierung die kritische Distanz und die hohe Fachkompetenz gegeben (Niegemann 2008).

[144] *„Eine Stichprobe gilt in der quantitativen Forschung als repräsentativ, wenn sie die Population, aus der sie stammt und über die Aussagen getroffen werden sollen, möglichst unverzerrt „im Kleinen" abbildet"* (Döring und Bortz 2016)

6.3.1.5 Versuchsinhalt: Anwendungsfall der experimentellen Auswahlentscheidung

Beide Verfahren wurden an einer fiktiven Auswahlentscheidung angewandt, bei welcher verschiedene marktverfügbare Kampfflugzeuge hinsichtlich deren Eignung zur Durchführung von zwei Missionen durch die Experten (siehe Kapitel 6.3.1.4) bewertet wurden. Dabei wurden u.a. technische, wirtschaftliche und logistische Faktoren betrachtet, welche über eine entsprechende hierarchische Struktur von Fähigkeiten und Kriterien als *A-Priori* Wissen dem Prozess beigestellt wurden (siehe Kapitel 4.2.1.2). Es wurden zwei exemplarische Missionen betrachtet, während aktuelle Kampfflugzeuge eine Vielzahl unterschiedlicher Missionen zu erfüllen haben (siehe Kapitel 2.1.2.3). Diese beiden Missionen waren im Einzelnen:

Tactical Air Reconnaissance (TAR): Das jeweilige System muss Allwetteraufklärung bieten. Sensorische Fähigkeiten (Optisch / IR / SAR) sind ebenso notwendig wie gleichzeitig genügend Abstand zu halten, um Bedrohungen zu vermeiden.

Defensive Counter Air (DCA): Die Fähigkeitsanforderungen beschreiben eine ausreichende Überlebensfähigkeit in Kombination mit einer Wirkung der Plattform gegen Luftziele und der dazu notwendigen Feinddetektierung.

Die vier Alternativen sind hinsichtlich ihres Potentials zur Erfüllung dieser Missionen zu bewerten und daraus abschließend eine entsprechende Auswahlentscheidung abzuleiten. Die militärischen Luftfahrzeuge wurden dabei mit entsprechenden Datensätzen (siehe Kapitel 6.2.1) abgebildet und standen vollumfänglich den Berechnungsmodulen (siehe Kapitel 6.2.2) zur Verfügung. Die Aufgaben der Experten waren im Einzelnen:

- Auswahl der Nutzenabsicht (TAR und DCA)
- Anpassung des *A-Priori* Wissens (Struktur, Gewichtung, Präferenzen)
- Ermittlung der Gewichtungsverteilung ausgewählter Knoten
- Ermittlung der Wertfunktion ausgewählter *Elementarer Kriterien* (nur *DESFACE*)
- Auswahl der Alternativen (ggf. Beladung + Kostenrechnung, nur *DESFACE*)
- Berechnung ausgewählter Ausprägungen (nur *DESFACE*)
- Ergebnisberechnung mit MCDA- Methoden
- Ergebnisanalyse
- Reporterstellung (nur *DESFACE*)

Die Aufgaben sind nicht als sequentielle Abfolge sondern vielmehr als iterativer Prozess zu verstehen. Ziel war die Ermittlung einer Rangfolge sowie die Analyse des Ergebnisses (siehe Kapitel 5.4). Dabei wurde der Bewertungsprozess nicht angeleitet und von den VP selbstständig durchgeführt.

6.3.2 Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden für die Durchführung der Bewertungsexperimente zwei Wochen benötigt. Nach (Niegemann 2008) verfügen Softwarebenutzer über ein *„unerschöpfliches“* Potential, *„das Produkt falsch zu interpretieren oder nicht in vorgesehener Weise zu benutzen“*. Daher wurde der gesamte Prozess zur Herbeiführung einer Auswahlentscheidung (AWE) hinsichtlich der Softwarebedienung begleitet und unterstützt. Zu Beginn der *summativen*[145] Validierung wurden die personenbezogenen Daten durch offene Fragen erhoben. Anschließend wurden die Erläuterung der theoretischen Hintergründe und der Methodik des Verfahrens sowie die operationelle Einweisung in die Applikation durchgeführt. Das Referenzvorgehen (RV) wurde bereits bei anderen Auswahlentscheidungen durch die VP genutzt. Beide

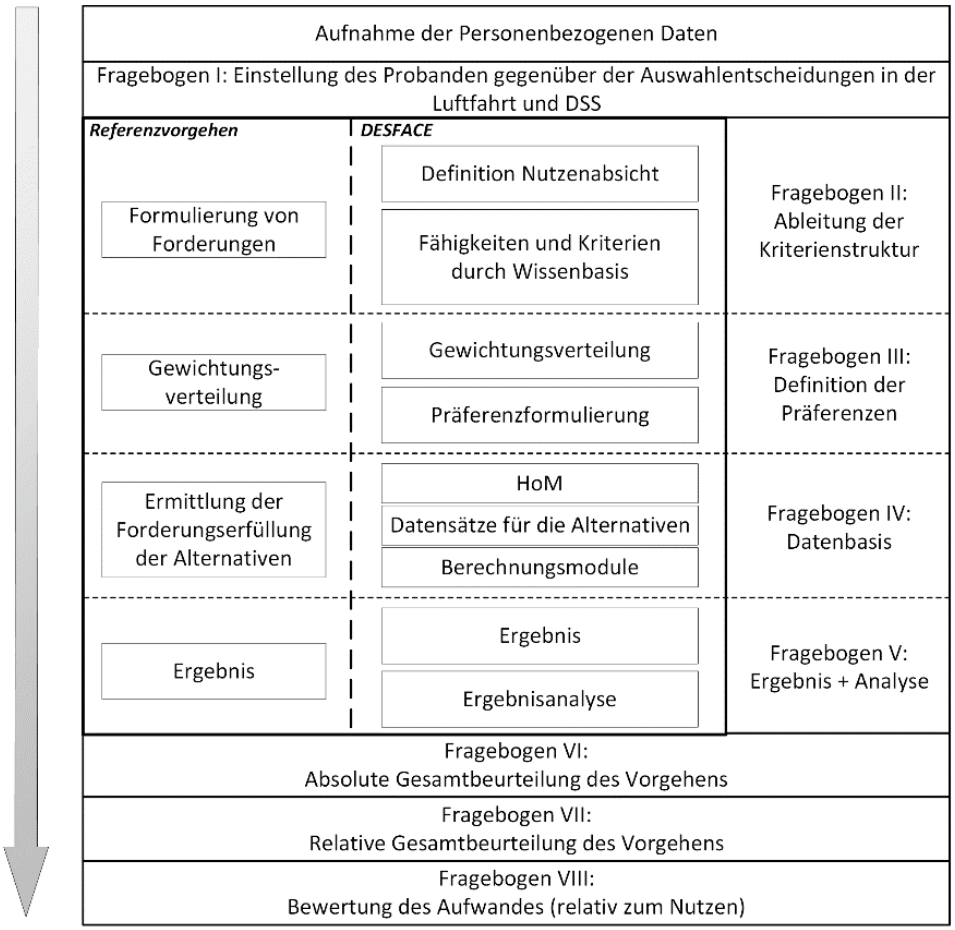


Abbildung 79: Schematischer Ablauf des Validierungsvorgehens. *Die Teilprozesse beider Vorgehen sind annähernd gleich. Zu jedem dieser Teilprozesse wurden Fragen formuliert, welche auf die AV ausgerichtet sind. Die Fragebögen wurden jeweils für beide Vorgehen ausgefüllt, so dass ein direkter Vergleich möglich ist. Abschließend erfolgt ein relativer Vergleich zwischen dem Referenzvorgehen und DESFACE. Dieses wird dazu genutzt, um die Konsistenz in den Antworten zu überprüfen und den absoluten Vergleich zu unterstützen. Das Referenzvorgehen ist das aktuelle Vorgehen, welches zur Unterstützung von militärischen Auswahlentscheidungen genutzt wird.*

[145] Die *summative* Evaluation prüft die praktische Anwendung des Werkzeuges nach der Entwicklung. Im Gegensatz dazu wird bei der *formativen* Evaluation entwicklungsbegleitend geprüft, inwieweit das System geeignet ist.

Bewertungsverfahren wurden sequentiell angewandt. Der Ablauf der Validierungsexperimente ist in Abbildung 79 schematisch dargestellt.

Nach der Nutzung jedes Vorgehens wurden die Fragebögen an die VP gegeben, so dass die gemachten Erfahrung, Eindrücke und Einschätzung im direkten Anschluss ungefiltert und unverfälscht[146] wiedergegeben werden konnten. Nachdem jeder Prozess einzeln betrachtet wurde, fand eine abschließende Bewertung beider Verfahren statt. Der letzte Fragebogen enthielt Fragen bzgl. der Verbesserung von *DESFACE* gegenüber dem RV, damit die Antworten aus den absoluten Fragen auf Konsistenz geprüft werden (Hollenberg 2016) und schlussendlich eine Gesamtbewertung von *DESFACE* relativ zu dem RV abgeleitet werden kann.

6.3.3 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Experimentalkampagne diskutiert, um eine Verbesserung von *DESFACE* quantifizieren und schlussendlich objektiv eine Eignung ableiten zu können. Zu Beginn – noch bevor das RV und *DESFACE* vorgestellt wurden – wurde die Einstellung der VP gegenüber AWE in der Luftfahrt, deren Affinität zu DSS sowie eine mögliche Voreingenommenheit erfragt.

6.3.3.1 Einstellung zu Auswahlentscheidungen und deren Unterstützung

Ein Auszug aus den Ergebnissen der persönlichen Einstellung der VP hinsichtlich der AWE in der Luftfahrt sowie zu der Nutzung von entsprechenden Unterstützungssystemen ist in Tabelle 20 dargestellt.

Die VP sind sich ihrer Verantwortung bei der Ableitung von AWE und Systembewertungen bewusst. Sie schätzen die erzeugten Ergebnisse als irreversibel und mit einem großen Einfluss auf Material und Menschenleben ein. Aus diesem Grund wurden auch intuitive Entscheidungen als nicht ausreichend erachtet. Weiterhin waren die VP gegenüber dem Einsatz von DSS im Rahmen von AWE und Systembewertungen positiv eingestellt. Dem gegenüber kann eine gewisse Uneinigkeit hinsichtlich der Notwendigkeit solcher Unterstützungssysteme festgestellt werden. Diese wurde teilweise bestätigt aber auch negiert, wodurch sich eine Unentschlossenheit ableiten lässt, welche bei der Diskussion der Ergebnisse später wieder aufgegriffen werden soll. Ebenso prangern die Probanden teilweise den fehlenden Praxisbezug solcher Systeme an, welcher einen Grund für die bereits diskutierte Anwenderlücke solcher DSS darstellt (siehe Kapitel 2.3.1). Weiterhin zeigt sich, dass eine Entscheidungsunterstützung von den VP prinzipiell gewünscht wird und sie dieser gegenüber zugeneigt sind. Auch gleichen sich die Antworten hinsichtlich der Nutzung von Intuitionen und Heuristiken bei komplexen AWE in der Luftfahrt. Die VP gaben an, dass sie nicht auf diese vertrauen und damit eine Strukturiertheit in der Entscheidungsfindung anstreben. Bezüglich der praktischen Relevanz und Tauglichkeit bestehender Ansätze ist eine große Spanne des Antwortbereiches zu erkennen. Während den bestehenden DSS teilweise kein Praxisbezug zugeschrieben

[146] Bereits die Beantwortung einfacher Fragebögen erfordert einen komplexen kognitions- und kommunikationspsychologischen Prozess, welcher themenrelevante Informationen aus dem Gedächtnis des Probanden benötigt. Die Erlangung der Information und die Befragung sollten möglichst nah beieinander liegen. (Hollenberg 2016)

wird, sehen einige VP diesen durchaus erfüllt. Dies ist mit den unterschiedlichen Erfahrungsstufen und Aufgabenbereichen der VP zu begründen.

	trifft vollkommen zu	trifft überwiegend zu	trifft teilweise zu	trifft selten zu	trifft sehr selten zu	trifft überhaupt nicht zu
Meine Bewertungsergebnisse haben einen großen Einfluss auf wichtige Entscheidungen	●	●●●	●●	●●		
Dem ET wird bei Auswahlentscheidungen von Luftfahrzeugen eine große Verantwortung zuteil	●●●●	●●●	●			
Intuitive Entscheidungen (*„aus dem Bauch heraus“*) sind meist ausreichend			●	●●	●●●	●●
Ich würde keine Unterstützung nutzen und vertraue auf meine Intuition				●	●●●●●	●●
Unterstützungssysteme haben meist keinen Praxisbezug			●	●●	●●●●	●
Erst durch Nutzung eines Unterstützungssystems zur Ableitung einer Auswahlentscheidung vertraue ich meinen Ergebnissen		●●●	●	●●●	●	
Die Entscheidungen bzw. Ergebnisse sollten … werden						
…detaillierter	●●●	●●●●	●			
…transparenter	●●●●●	●●	●			
…nachvollziehbarer	●●●	●●●●	●			
…objektiver	●●●●●●	●●				
…vertrauenswürdiger	●●●	●●●●	●			

Tabelle 20: Einstellung der VP gegenüber Auswahlentscheidungen und Unterstützungssystemen in der Luftfahrt. *Die Antworten der einzelnen Testpersonen werden durch Punkte in den jeweiligen Feldern verdeutlicht. Allgemein zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der Angaben.*

Bezüglich der Einstellung gegenüber neuen Verfahren (Abbildung 80) lässt sich eine große Spanne zwischen den Antworten erkennen. Unter der Bandbreite der Antworten sind zusätzlich die prozentualen semantischen Ausprägungen in einer fünfstufigen Skala aufgeführt. Mit dieser Darstellung wird die Verteilung der Antworten verdeutlicht, speziell die Zusammensetzung des Mittelwertes lässt sich genauer nachvollziehen. Während 87,5% (7 VP) einer neuen Methodik offen gegenüberstehen, äußerten 12,5% (1 VP) eine gewisse Skepsis (-1). Ein ähnliches Bild zeigt sich bei dem Misstrauen, welches von 25% (-2) der VP stark und von 12,5% (-1) schwach bestätigt wurde. Dennoch zeigt sich, dass die VP im Durchschnitt einem neuen Verfahren offen gegenüberstehen (Median = 1,375) und unvoreingenommen (Median = 1) sind.

Bezugnehmend zu aktuellen Vorgehen und deren Nachteilen wurden Fragen bzgl. einer notwendigen Verbesserung solcher DSS in Bezug auf die AV (Kapitel 6.3.1.3) gestellt. Aus dem unteren Bereich von Tabelle 20 wird ersichtlich, dass ein DSS mit einem verbesserten Potential in den AV gefordert und damit der identifizierte Forschungsgegenstand dieser Arbeit zusätzlich bestätigt wird. Die VP äußerten weiterhin, dass ein entsprechendes DSS – welches die Verbesserung in den o.g. Bereichen umsetzt – notwendig

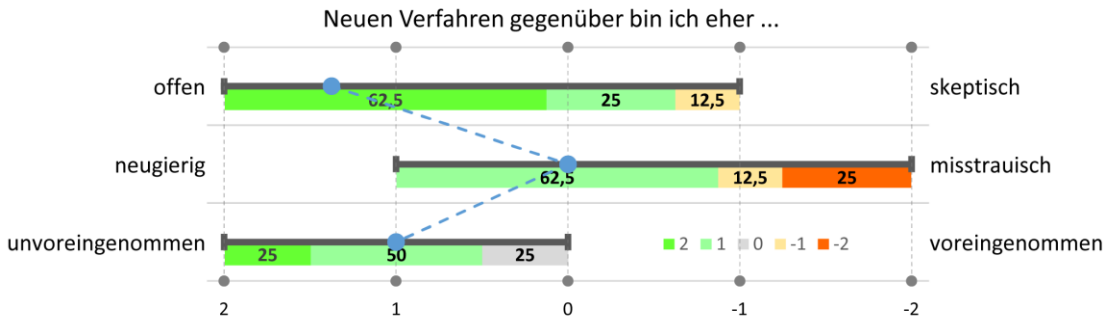


Abbildung 80: Einstellung der Testpersonen neuen Verfahren gegenüber. *Dargestellt ist das Semantische Differential in einer bipolaren Skala, welche die Einstellung der Versuchspersonen ausdrückt. Der Mittelwert wird durch die Punkt repräsentiert und die Balken geben die entsprechende Spanne der Antworten an. Unterhalb dieser Balken ist die genaue Verteilung auf der bipolaren Skala dargestellt.*

ist. Dabei herrscht allerdings geteilte Meinung darüber, ob ein solches System realisierbar (20%) oder nicht umsetzbar ist (40%). Die übrigen 40% können diese Einschätzung nicht treffen und gaben eine neutrale Antwort (nicht in Tabelle 20 aufgeführt). Dies zeigt, dass die Entwicklung eines geeigneten DSS durch die ET bereits gefordert bzw. gewünscht wird, diese allerdings nicht von dessen Realisierbarkeit überzeugt sind (Anwendungsprobleme von DSS, siehe Kapitel 2.3.1). Daher soll im Folgenden untersucht werden, ob mit *DESFACE* solch ein System umgesetzt werden konnte.

6.3.3.2 Absoluter Vergleich der Verfahren

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des absoluten Vergleichs zwischen dem RV und *DESFACE* diskutiert. In den folgenden Darstellungen werden die Ergebnisse (Median) für das RV mit einem orangenen Quadrat (■) und für *DESFACE* mit einem blauen Punkt (●) gekennzeichnet. Die Spanne der Antworten wird identisch zu Abbildung 80 mit Balken in beide Richtungen vom Median angegeben. Zusätzlich werden ebenfalls identisch zu Abbildung 80 die Verteilung der Antworten als farbige Bereiche dargestellt.

In dem folgenden Abschnitt werden die jeweiligen Teilbereiche aus Tabelle 18 einzeln betrachtet und deren Ergebnisse diskutiert. Dabei werden z.B. die Teilbereiche (*Kriterienstruktur*, *Präferenzen*, *Datenbasis allgemein*) zur Erstellung und Verwaltung der Datenbasis aufgrund ihrer Zusammengehörigkeit gemeinsam und die übrigen Teilbereiche einzeln behandelt.

6.3.3.2.1 Aufbau der Datenbasis

Bei der Ableitung der Datenbasis wurden die Kriterienstruktur angepasst sowie die notwendigen Wertvorstellungen formuliert. Diese bestehen aus Gewichtungsverteilungen und Präferenzfunktionen in Form von Vorzugswerten (siehe Kapitel 5.2.5). Zu Beginn wurde die A-Priori Struktur mit den betrachteten Missionen (*Tactical Air Reconnaissance* (TAR) und *Defensive Counter Air* (DCA)) abgeglichen. Während die Darstellung der Struktur in dem RV eine hierarchische Listendarstellung war, wurde bei *DESFACE* die bereits beschriebene Blockstruktur grafisch umgesetzt (siehe Kapitel 5.2.1). Diese führte laut Abbildung 81 zu einer übersichtlicheren Darstellung (Median RV = 1,5; Median *DESFACE* = 2,4) und zu einem verbesserten Verständnis hinsichtlich der Verbindung zwischen den Missionen und den

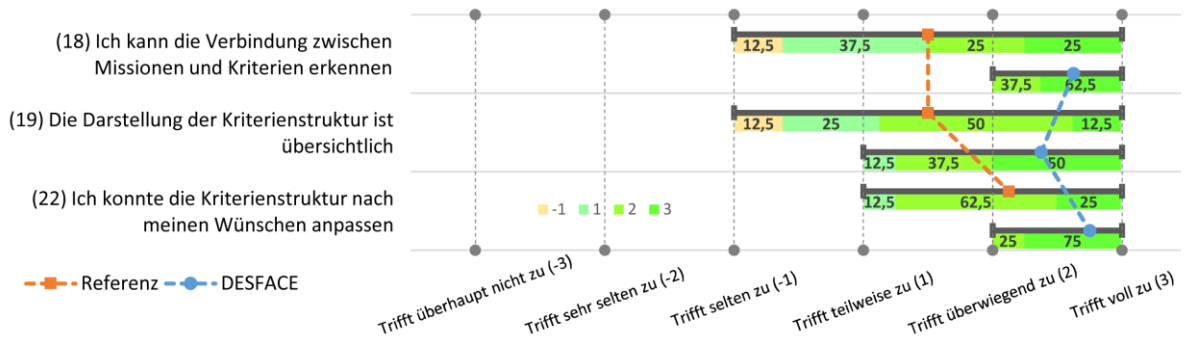


Abbildung 81: Ablage der Kriterienstruktur als Teil der Datenbasis. *Die Darstellung zeigt den Vergleich zwischen dem Referenzvorgehen und DESFACE hinsichtlich der Darstellung der Kriterien. Es zeigt sich, dass bei dem Referenzvorgehen eine große Antwortspanne vorliegt, während bei DESFACE größere Einigkeit bestand.*

zugehörigen Kriterien (Median RV = 1,5; Median *DESFACE* = 2,6). Bzgl. der Editierbarkeit dieser Struktur wurden ebenfalls Unterschiede geäußert, was mit den begrenzten Möglichkeiten des RV begründet werden kann. Diese Editierung beinhaltet bspw. das Hinzufügen und Löschen von Einträgen, die Veränderung des Namens, Anpassung der Gewichtung, das Setzen von Beschränkungen (KO-Kriterien) oder Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen.

Zusätzlich zu den Kriterien wurden die Präferenzen definiert. Diese wurden zu einem Großteil in dem A-Priori Wissen vorgegeben und mussten zu einem kleinen Teil von den VP für einen kleinen Bereich der Umweltwahrnehmung (Radar, EO/IR) selbst definiert werden. Die Gewichtungen wurden in dem RV direkt vergeben, während *DESFACE* den ET mit einer methodischen Ableitung unterstützt (siehe Kapitel 5.2.4). Der Vergleich der Gewichtungsfindung und -darstellung ist in den oberen drei Items in Abbildung 82 gezeigt. Die Unterstützung wurde bei *DESFACE* (Median = 2,5) höher eingeschätzt als bei dem RV (Median = -1,6). Gleichzeitig war eine genauere (spezifischer auf die Nutzenabsicht ausgerichtete) Ableitung der Gewichtungsverteilung möglich. Die Darstellung bei *DESFACE* wurde zusätzlich etwas

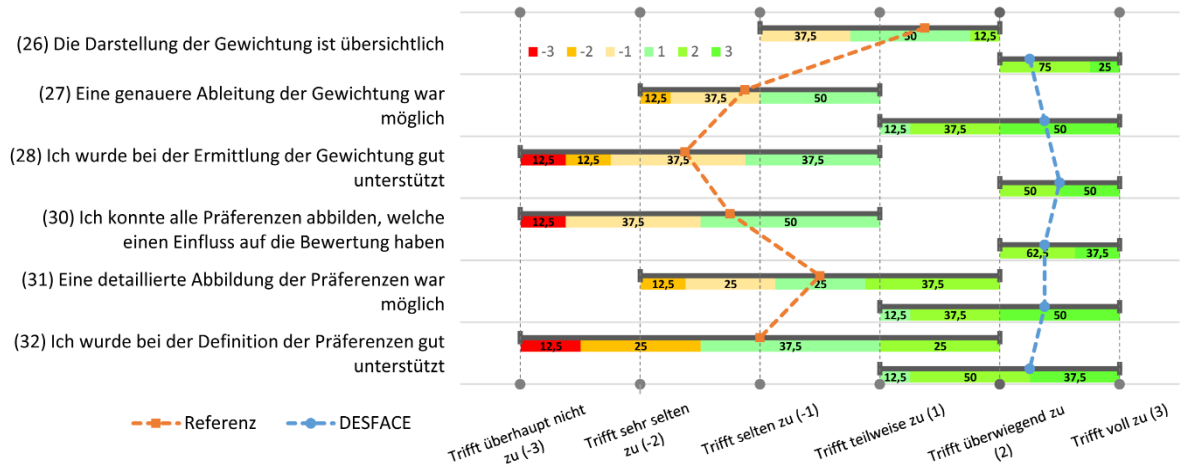


Abbildung 82: Definition und Abbildung der Wertvorstellungen. *Die Ableitung der Gewichtung wurde bei DESFACE durch einen Fuzzy AHP Ansatz unterstützt. Weiterhin können bei DESFACE Wertfunktionen definiert werden, welche einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.*

übersichtlicher empfunden (Median *DESFACE* = 2,3; Median RV = 1,3). Eine deutlichere Abweichung zeigt sich bei der Möglichkeit zur Abbildung der Vorzugswerte (Präferenzfunktionen für *Promethee* und Nutzenfunktionen für die *Nutzwertanalyse*), was – wie bereits erwähnt – in den Möglichkeiten beider Verfahren selbst begründet ist. *DESFACE* ermöglicht eine Ableitung all der genannten und relevanten Funktionen (Median = 2,4), während das RV diese Möglichkeiten nicht bietet (Median = -1,3). Allerdings haben diese Funktionen eine(n) hohe(n) Bedeutung (Einfluss) für (auf) die Bewertung. Die Unterstützung bei der Ableitung dieser Präferenzen wurde für *DESFACE* ebenfalls bestätigt (Median = 2,25).

In Tabelle 21 wird aufgeführt, wie die Ableitung und Darstellung der Datenbasis die Komplexität reduziert und wie diese das Vertrauen der VP in das Vorgehen beeinflusst. Dazu wurde in *DESFACE* die Methodik des *House of Metrics (HoM)* integriert, welche bereits detailliert in Kapitel 4.2 beschrieben wurde. Während einer Reduzierung der Komplexität beim RV nicht zugestimmt wird (Median = -0,5), wird bei *DESFACE* eine solche Reduzierung (Median = 1,75) festgestellt. Weiterhin wurde bestätigt, dass durch das *HoM* eine Abbildung der Wechselwirkungen und Abhängigkeiten (Kapitel 4.2.3.7.2) möglich wird (Median = 2,5), welche ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. Weiterhin lassen sich diese Abhängigkeiten einfach editieren (Median = 2). In diesem Bereich wird nur die Einschätzung für *DESFACE* angegeben, da das RV generell keine Möglichkeit zur Definition und damit Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen besitzt.

	trifft vollkommen zu (3)	**trifft überwiegend zu (2)**	**trifft teilweise zu (1)**	**trifft selten zu (-1)**	**trifft sehr selten zu (-2)**	**trifft überhaupt nicht (-3)**
(34) Die Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Kriterien war in ausreichendem Maße möglich	●●●●	●●●●	■	■■	■■	■■■
(35) Die Abhängigkeiten können einfach editiert werden	●●	●●●●	●●			
(36) Die Darstellung der Datenbasis reduziert die Komplexität	●	■ ●●●●	■■ ●●●	■■	■■■	

Tabelle 21: Angaben zur Datenbasis beider Vorgehen. *Die Antworten für das RV sind mit einem Quadrat gekennzeichnet, DESFACE wird einem Punkt repräsentiert. Da keine Abhängigkeiten und Wechselwirkungen mit dem RV betrachtet werden können, wurden für die letzte Zeile keine Angaben zum RV gemacht.*

Zusammenfassend kann gezeigt werden, dass mit dem *HoM* eine deutliche Reduktion der Komplexität erreicht wurde und sich diese Methodik damit zur Strukturierung der komplexen Datenbasis eignet. Ebenso kann Potential für weitere Verbesserungen (Vereinfachung) identifiziert werden, dessen Umsetzung allerdings durch die VP nicht verbalisiert werden konnte. In diesem Bereich sind weitere Untersuchungen anzustellen.

Abschließend wird noch ein Vergleich der Datenbasen beider Vorgehen mit dem *Semantischen Differential* in Abbildung 83 aufgeführt. Es zeigt sich erneut, dass eine übersichtlichere Darstellung bestätigt werden kann. Weiterhin wurde die Relevanz einer solchen Datenbasis für beide Vorgehen geäußert. Bei der Einschätzung der Komplexität zeigt sich, dass die Datenbasis von *DESFACE* weder als zu komplex noch als zu vereinfacht empfunden wird, was mit den Antworten aus Tabelle 21 konsistent ist. Diese

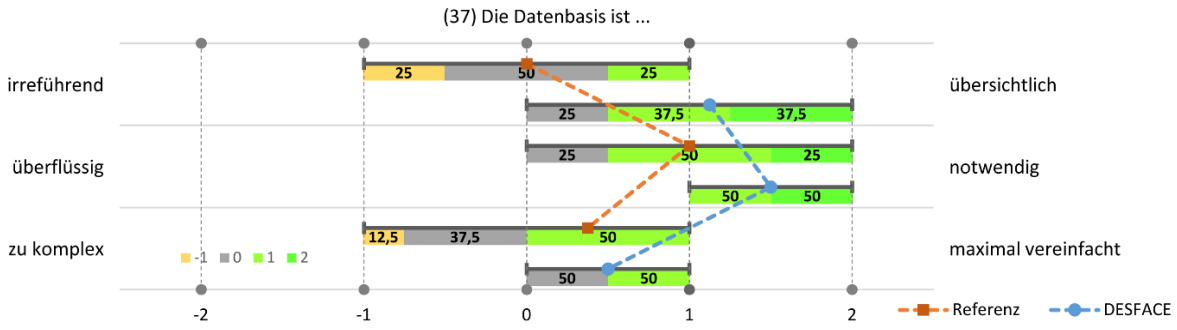


Abbildung 83: Semantisches Differential der Datenbasis beider Vorgehen. *Für DESFACE kann festgestellt werden, dass der Umfang der Datenbasis nach Meinung der VP den richtigen Umfang besitzt. Diese ist weder zu einfach noch zu komplex, während für das RV eine leichte Tendenz zur Vereinfachung angezeigt wird.*

Ergebnisse aus dem absoluten Vergleich werden in Kapitel 6.3.3.4 erneut aufgegriffen, um eine prozentuale Verbesserung in den einzelnen AV zu quantifizieren.

6.3.3.2.2 Ergebnis und Analyse

Bei der Ermittlung und Darstellung der Ergebnisse beider Vorgehen wurden ebenfalls signifikante Unterschiede deutlich (Abbildung 84). Während das RV ein Ergebnis in Form einer prozentualen Erfüllung der definierten Maximalwerte ermittelt, stellt *DESFACE* eine Vielzahl an unterschiedlichen Ergebnissen und Darstellung bereit. Diese können deutlich detailliertere Fragestellungen der ET beantworten (Median RV = -1,3; Median *DESFACE* = 2,6), da bspw. ebenfalls Zwischenergebnisse in jedem einzelnen Knoten dargestellt werden und vom ET eingesehen werden können. Damit kann die Zusammensetzung deutlich besser nachvollzogen (Median RV = -0,75; Median *DESFACE* = 2,2) sowie Stärken und Schwächen ermittelt werden (Median RV = -1,4; Median *DESFACE* = 2,1). Im Fall von *DESFACE* wird eine deutlich

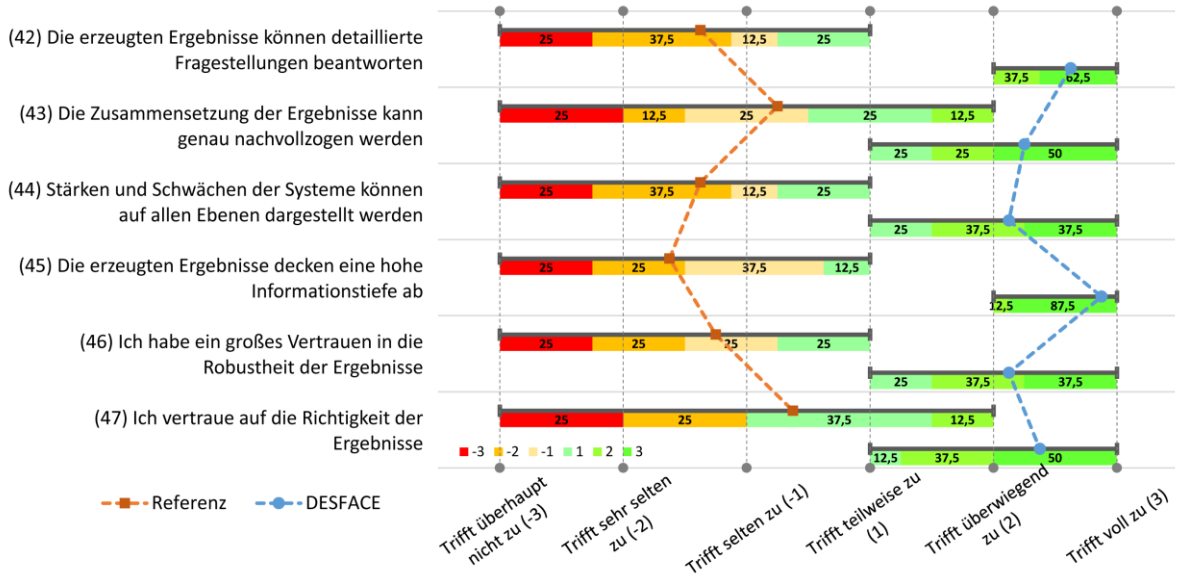


Abbildung 84: Einschätzung der Ergebnisse beider Vorgehen. *Es zeigt sich, dass sich die Mittelwerte für das RV am linken Rand orientieren, während sich diese für DESFACE am rechten Rand ausrichten.*

höhere Informationstiefe abgedeckt, welche schlussendlich zu einem größeren Vertrauen in die Robustheit (Median RV = -1,25; Median *DESFACE* = 2,1) und die Richtigkeit (Median RV = -0,6; Median *DESFACE* = 2,4) der Ergebnisse führt. Die Robustheit kann bei *DESFACE* durch lokale und globale Sensitivitätsanalysen überprüft werden. Allgemein lässt sich erkennen, dass sich die Antworten zum RV eher am linken Rand (*trifft überhaupt nicht zu*) orientieren, während sich die Antworten bzgl. *DESFACE* am rechten Rand (*trifft voll zu*) ausrichten.

Die Darstellung der Ergebnisse wurde mit dem *Semantischen Differential* für *DESFACE* als umfassend (Median = 1,5), übersichtlich (Median = 1,5) und hilfreich (Median = 1,3) beschrieben, während für das RV eine weder übersichtliche noch unübersichtliche (Median = 0,2), eher lückenhafte (Median = -1) und ungeeignete (Median = -0,75) Ergebnisdarstellung geäußert wurde[147].

6.3.3.2.3 Gesamtbeurteilung des Vorgehens

In der Gesamtbeurteilung beider Vorgehen (Abbildung 85) wurde sowohl eine Gesamteinschätzung als auch eine Eignung bzw. ein Nutzungswunsch beider Vorgehen abgeleitet. Ein Ziel von *DESFACE* war es, den Entscheidungsprozess trotz der Vielzahl an subjektiven Faktoren zu objektivieren. Einer maximalen Objektivierung wurde bei *DESFACE* zugestimmt (Median = 2), während für das RV diese negiert wurde (0,6). Daraus ergibt sich auch ein Vertrauen in das gesamte Vorgehen, welches bei *DESFACE* deutlich

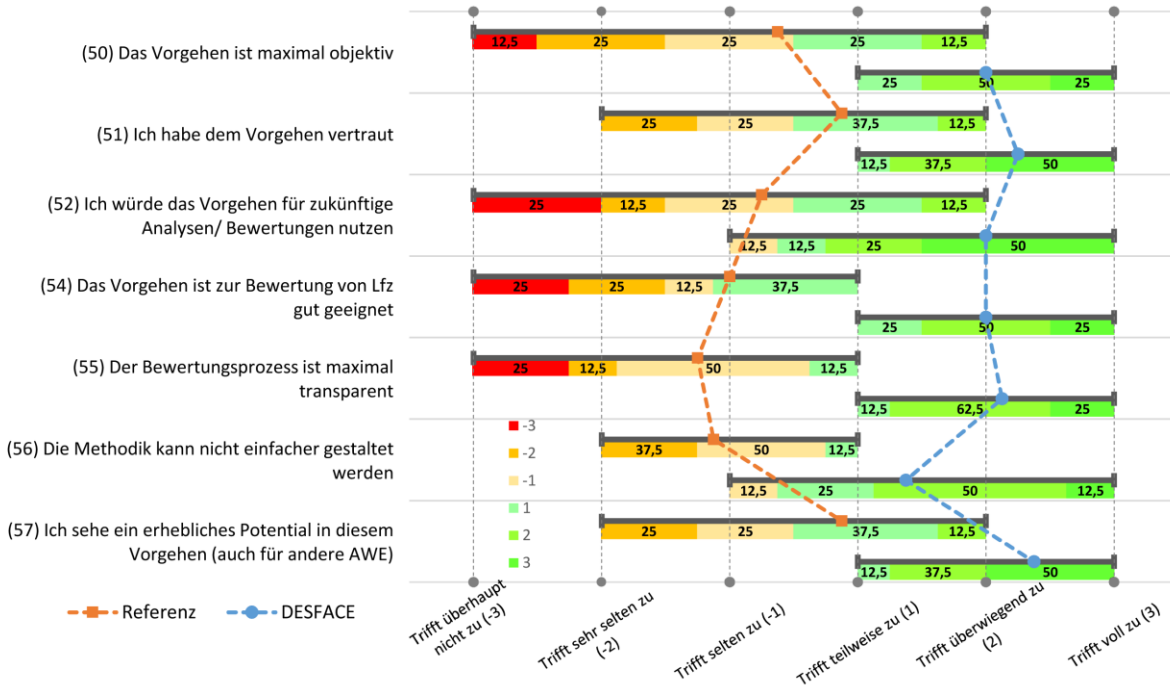


Abbildung 85: Bewertung des Gesamtvorgehens. *DESFACE zeigt in allen Bereichen eine Verbesserung in Relation zum Referenzvorgehen. Diese Verbesserung wird später noch absolut quantifiziert.*

[147] nicht in der Abbildung dargestellt

(Median = 2,3) und für das RV nur schwach (Median = 0,2) bestätigt wurde. Weiterhin hat sich die Transparenz des gesamten Prozesses deutlich gesteigert. Eine maximale Transparenz wurde *DESFACE* mit dem Median = 2,1 bestätigt, während dieser bei dem RV nicht zugestimmt wurde (Median = -1,2).

Daraus resultiert, dass die VP das Vorgehen für deren eigene Arbeit nutzen würden (Median = 2), während dem RV kein Nutzungswunsch ausgesprochen wird (Median = -0,8). Dabei ist hervorzuheben, dass die Bandbreite der Antworten für beide Vorgehen sehr groß ist. Für *DESFACE* wurde die Nutzung in einem Fall schwach negiert, was nach Rücksprache mit der VP in dem Umfang der Methodik begründet wurde, welcher für die Tätigkeit dieser VP überdimensioniert ist. Gleichwohl wurde mit einer großen Übereinstimmung bestätigt, dass *DESFACE* für die Bewertung von Luftfahrzeugen besser geeignet ist (Median RV = -1; Median *DESFACE* = 2). Weiterhin wurde *DESFACE* ein erhebliches Potential sowohl für die Bewertung von Luftfahrzeugen als auch als Rahmenwerk für andere technische Systembewertungen und AWE zugesprochen (Median = 2,4). Ebenso lässt sich erkennen, dass nach Auffassung der VP die Methodik Potential aufweist, einfacher gestaltet zu werden. Dieser Punkt ist genauer abzuklären, da durch die VP keine näheren Äußerungen gemacht werden konnten.

Mit dem *Semantischen Differential* wurden die Vorgehen auf einer bipolaren Skala eingeschätzt. In Abbildung 86 zeigt sich, dass beide Vorgehen gleich verständlich sind, während sich bei der Tauglichkeit Unterschiede zeigen. Die VP schätzten *DESFACE* als eindeutig tauglicher (Median = 1,375) für die Bewertung von Luftfahrzeugen ein als das RV (Median = 0). Zusätzlich wird *DESFACE* eine höhere Transparenz (Median RV = -0,5; Median *DESFACE* = 1,5) sowie Objektivität (Median RV = -0,1; Median *DESFACE* = 1,5) zugesprochen. Die Auswertung des *Semantischen Differentials* deckt sich dabei mit der Einschätzung aus Abbildung 85.

Jedes der *Items* aus dem Fragebogen deckte mindestens eine AV ab (siehe Tabelle 18), so dass durch den Mittelwert der prozentualen Erfüllungen für beide Vorgehen ein absoluter Vergleich durchgeführt werden kann. Diese Erfüllung ist in Abbildung 87 oben dargestellt. Die orangenen Balken zeigen die

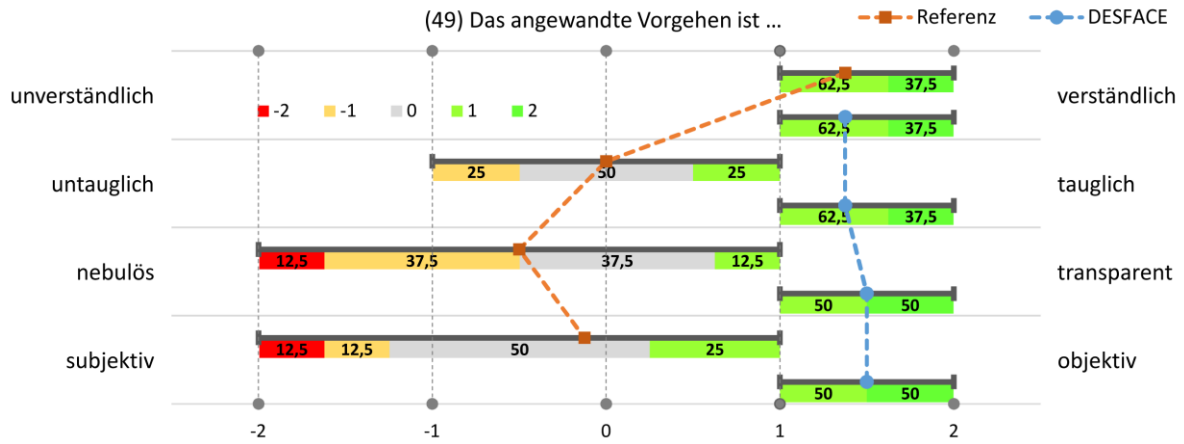


Abbildung 86: *Semantisches Differential* für die Bewertung des Gesamtvorgehens. *DESFACE richtet sich am rechten Rand der bipolaren Skala aus, während das RV überwiegend mittig zu finden ist. Einzig bei der Verständlichkeit sind beide Vorgehen annähernd identisch. Dabei ist diese gleichwertige Verständlichkeit bei DESFACE aufgrund der komplexeren Methodik deutlicher hervorzuheben.*

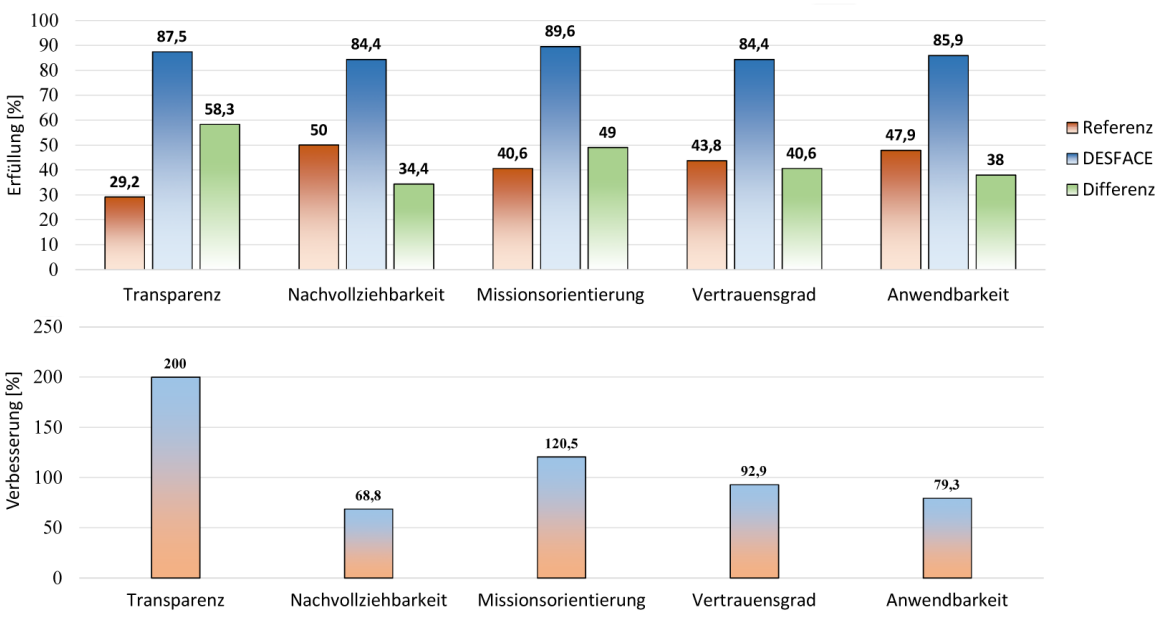


Abbildung 87: Erfüllung der AV durch beide Vorgehen und resultierende Verbesserung. *Die ersten beiden Balken zeigen die Erfüllung der AV (RV links; DESFACE: rechts). Die resultierende Verbesserung wird mit dem letzten Balken verdeutlicht. Es lässt eine durchschnittliche Verbesserung über alle AV (Akzeptanz) von 48% ermitteln.*

Erfüllung des RV für die AV *Transparenz*, *Nachvollziehbarkeit*, *Detaillierung* (Genauigkeit), *Vertrauensgrad* und *Anwendbarkeit* aus Kapitel 6.3.1.3. Der Aufwand wurde in dieser Darstellung nicht aufgeführt und soll im nächsten Kapitel betrachtet werden. Diese Kombination aus konzeptioneller *Qualität* und operationeller *Anwendbarkeit* wurde in Kapitel 6.3.1.3 als *Akzeptanz* definiert und beträgt für das RV 42%. Mit den blauen Balken werden die Erfüllungen für *DESFACE* verdeutlicht, welches eine *Akzeptanz* (durchschnittliche Erfüllung) von 86% aufweist. Neben diesen beiden Balken zeigt der rechte grüne Balken jeweils die absolute Differenz für die Erfüllung beider Vorgehen an. Diese beträgt durchschnittlich 44%, was als absolute Erhöhung der *Akzeptanz* verstanden werden kann.

Die resultierende Verbesserung durch *DESFACE* in Bezug zu dem RV ist in Abbildung 87 unten aufgeführt. Die blau-orangenen Balken zeigen die prozentuale Verbesserung von *DESFACE* in Relation zu dem RV. Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung in allen AV. Besonders hervorzuheben ist dabei die Verbesserung in der *Transparenz* in der Entscheidungsvorbereitung, welche durch die entwickelte Methodik des *House of Metrics* erreicht wurde. Die geringste Verbesserung ist im Bereich der *Nachvollziehbarkeit* der Ergebniszusammensetzung festzustellen, welche allerdings trotzdem über 68% beträgt. Diese Verbesserung variieren mit der Ausprägung des RV, weshalb dieses stets in Relation zu betrachten ist. Darin wird deutlich, dass speziell bei der *Transparenz* eine geringe Ausprägung zu finden ist, welche die überdurchschnittliche relative Verbesserung von 200% erklärt. Insgesamt kann eine durchschnittliche relative Erhöhung der *Akzeptanz* um 112% quantifiziert werden.

6.3.3.2.4 Aufwand

Neben dem Nutzen ist auch der notwendige Aufwand erfasst worden, um schlussendlich eine Bilanz bzgl. Nutzen/Aufwand ziehen zu können. Dazu soll in diesem Kapitel der notwendige Aufwand sowie das Verhältnis von Nutzen/Aufwand für beide Vorgehen betrachtet werden. Dass der Aufwand in Relation zu der erreichten Ergebnisgenauigkeit (Detaillierung) steht, wird in Abbildung 88 belegt. Der These, dass

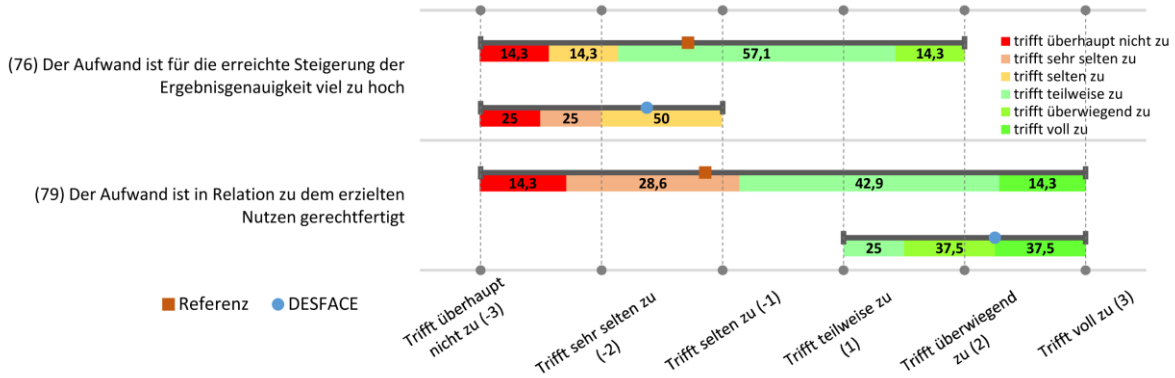


Abbildung 88: Bewertung des Aufwandes in Relation zu dem Nutzen. *Für DESFACE wurde bestätigt, dass der Aufwand für den erzielten Nutzen nicht zu hoch sondern dieser vielmehr gerechtfertigt ist. Für das RV konnten nur die Auswertungen von 7 VP genutzt werden (auf einem Fragebogen wurde diese Items nicht bearbeitet). Auf eine Verbindung der Punkte wurde in dieser Darstellung verzichtet.*

der Aufwand viel zu hoch ist für die erreichte Ergebnisgenauigkeit, wurde sowohl für das RV (Median = -1,2) als auch für *DESFACE* (Median = -1,7) widersprochen. In Verbindung damit wurde erfragt, ob der Aufwand in einem angemessenen Verhältnis zum erzielten Nutzen stand. Unter Nutzen ist in diesem Fall die Erfüllung der AV – wie in Abbildung 87 dargestellt – zu verstehen. Im Falle des RV wurde diesem gerechtfertigten Aufwand widersprochen (Median = -1,1), während für *DESFACE* ein Median von 2,2 und damit ein ausgewogenes Verhältnis von Aufwand zu Nutzen ermittelt werden konnte.

Neben der subjektiven Abfrage des Aufwandes wurden ebenfalls die benötigten und durchgeführten Interaktionen mit der Benutzeroberfläche erfasst. Dazu zählen die getätigten Nutzereingaben sowie die entsprechenden Zeiten. Diese Interaktionen wurden in Bezug auf die einzelnen Module des DSS erfasst.

Modul	Beschreibung	RV	*DESFACE*
Block	Navigation durch die Blöcke (Mission, Fähigkeiten, Kriterien)	✗	✓
Gewichtung	Verdeutlichung und Anpassen der Gewichtungsverteilung	✓	✓
MCDA	Definition der Präferenzen und Daten für die MCDA Methoden	✗	✓
HoM	Navigation durch das HoM; Definition von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten sowie Zielfunktionen	✗	✓
Konfig (Auswahl AC)	Auswahl und Konfigurationsmanagement (Beladung) der Lfz sowie Kostenrechnung	✗	✓
EK	Subjektive und objektive Quantifizierung der Elementaren Kriterien	✓	✓
Ergebnis	Steigerung der Transparenz und Plausibilität des Ergebnisses	✓	✓
Anpassen	Anpassen der zugrundeliegenden Datenbasis	✓	✓

Tabelle 22: Module für die Interaktion mit der Applikation. *Die letzten beiden Spalten geben an, welche Module von beiden Vorgehen vorgesehen und damit erfasst werden können.*

In Tabelle 22 sind die Module erläutert. Es ist zu erkennen, dass in dem RV nicht alle Module erfasst werden können, da diese teilweise nicht vorgesehen sind. Diese Abdeckung ist in den letzten beiden Spalten aufgeführt.

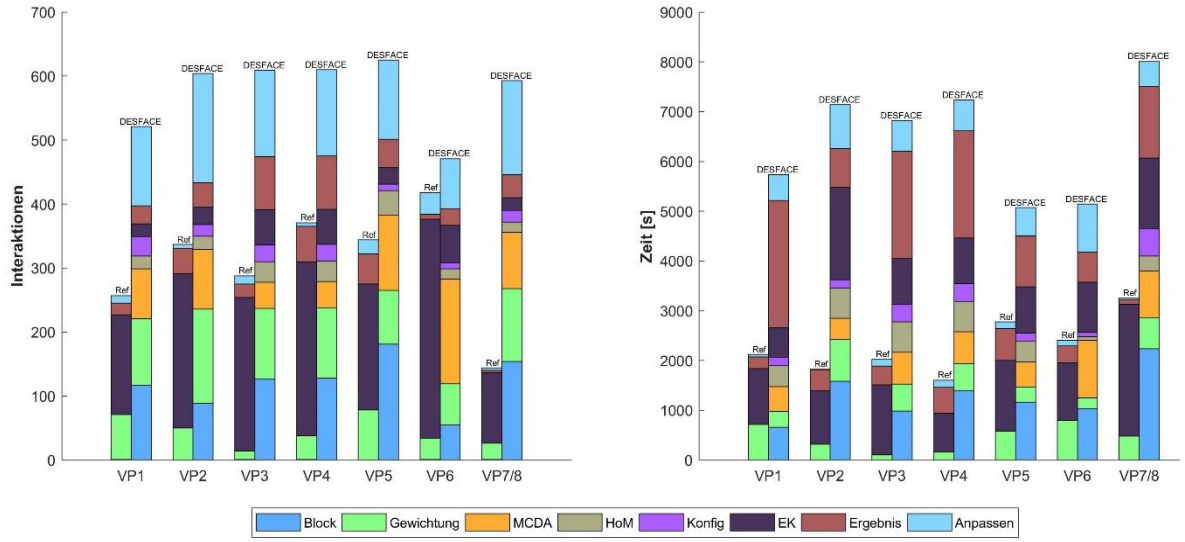


Abbildung 89: Interaktionen mit der Applikation und benötigte Zeiten für die einzelnen Module. *In der linken Grafik sind die Interaktionen (Klicks) mit der Oberfläche dargestellt. Es zeigen mindestens doppelt so viele Interaktionen mit der Oberfläche bei DESFACE. In der rechten Grafik sind die benötigten Zeiten aufgeführt. Die Gesamtzeit ist dabei durchschnittlich um den Faktor 3,5 höher als bei dem RV. Versuchsperson 7 und 8 haben beide Vorgehen aufgrund zeitlicher Verfügbarkeit zusammen benutzt.*

In Abbildung 89 sind die Interaktionen (Eingaben mit Tastatur und Maus) für beide Vorgehen sowie die benötigten Zeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass *DESFACE* deutlich mehr Eingaben benötigt. Die dabei benötigte Zeit ist ebenfalls größer, speziell im Bereich der Vertrauensbildung und der Anpassung der zugrundeliegenden Datenbasis. Darunter fallen bspw. die Anpassung der Kriterienstruktur, die Definition der Präferenzen und die Konfiguration der betrachteten Alternativen (bspw. Beladung der Luftfahrzeuge). Es zeigt sich deutlich, dass die VP die Möglichkeiten zur Steigerung des Vertrauens in die Ergebnisse umfangreich genutzt haben. Weiterhin wurden bei der Quantifizierung der Kriterien (EK) weniger Interaktionen benötigt, weil durch die beigestellten Berechnungsmodule keine subjektive Vergabe der Ausprägungen nötig ist. Die benötigte Zeit steigt allerdings aufgrund des größeren Berechnungsaufwandes relativ zu der subjektiven Editierung der Ausprägung im RV. Der Zeitansatz für die Bearbeitung der Bewertungsaufgabe mit *DESFACE* ist insgesamt ca. um den Faktor 3,5 größer als bei dem RV. Weiterhin sind die benötigten Interaktionen doppelt so groß. Ausschlaggebend ist allerdings, ob der Nutzer

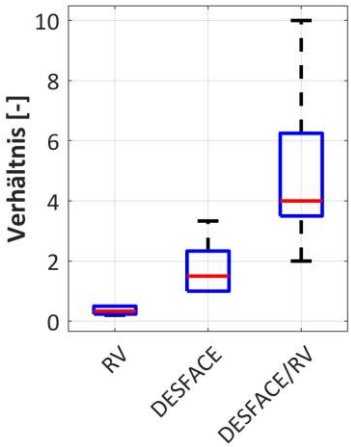


Abbildung 90: Nutzen/Kosten Verhältnis beider Vorgehen und Verbesserung durch *DESFACE*. *DESFACE konnte das Nutzen/Kosten Verhältnis um den Faktor 4 erhöhen.*

ein Vorgehen aufgrund des Nutzen/Aufwand Verhältnisses ablehnt oder präferiert. Dieses Verhältnis wurde ebenfalls quantifiziert, welches sich bei dem RV zu 0,42 und für *DESFACE* zu 1,7 ergibt (siehe Abbildung 90). Der resultierende Faktor zwischen Nutzen/Aufwand von *DEFACE* in Bezug zum RV wird in dem rechten Boxplot dargestellt und beträgt durchschnittlich 4, d.h. das Verhältnis von Nutzen/Aufwand ist für *DESFACE* um diesen Faktor gestiegen. Damit kann der höhere Aufwand relativiert werden, da mit diesem gleichzeitig der Nutzen überproportional gesteigert wurde.

Insgesamt lässt sich aus der Betrachtung des Aufwandes (Zeit und Interaktionen) ableiten, dass dieser für *DESFACE* deutlich höher ist, was bereits vorab angenommen wurde. Dennoch konnte der erhöhte Aufwand zu einer signifikanten Steigerung des Nutzens führen, wodurch dieser in jedem Falle gerechtfertigt ist, was durch die VP ebenso geäußert wurde (vgl. Abbildung 88).

6.3.3.3 Relativer Vergleich

In Ergänzung zur absoluten Bewertung (siehe Kapitel 6.3.3.2) wurde ein relativer Vergleich betrachtet, um zusätzlich eine relative Bevorzugung von *DESFACE* zu ermitteln. Während vor der Anwendung die VP keine konkrete Meinung bezüglich der Nutzung eines DSS hatten und die Praxisnähe vermisst haben (vgl. Tabelle 20), zeigt sich in den Antworten aus Abbildung 91, dass eine direkte Bevorzugung (Median = 2,75) dieses Ansatzes durch die VP geäußert wurde (*Item* 71). Alle Ausprägungen konzentrieren sich am rechten Rand, was einer Bevorzugung von *DESFACE* entspricht. Bspw. wurden ein größeres Vertrauen (Median = 2,8) sowie eine erhöhte Transparenz (Median = 2,75) bestätigt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse als nachvollziehbarer (Median = 2,6), vertrauenswürdiger (Median = 2,8) und detaillierter (Median = 2,5) eingeschätzt.

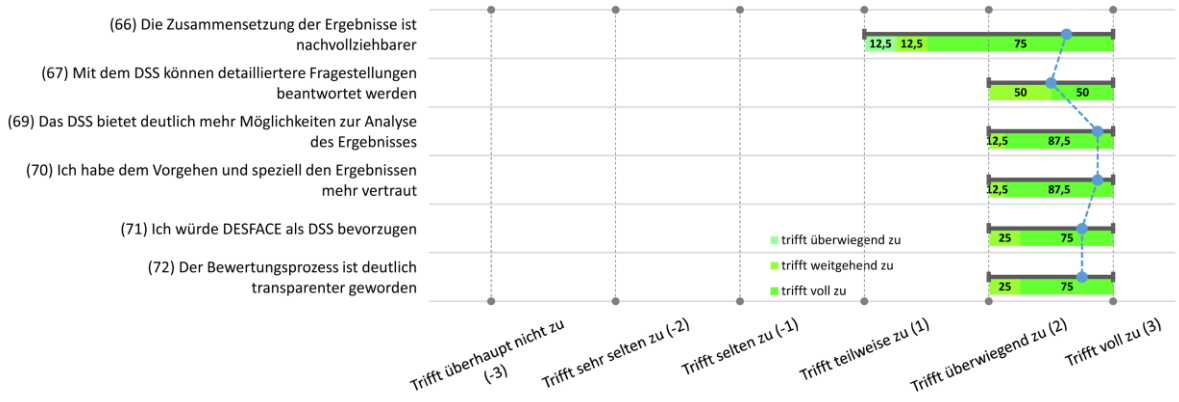


Abbildung 91: Relative Bewertung des generellen Vorgehens von *DESFACE* gegenüber dem RV. *Alle Mittelwerte befinden sich zwischen einer überwiegenden und vollen Zustimmung hinsichtlich einer Verbesserung. Mit diesen relativen Einschätzungen können allerdings nur qualitative Aussagen getroffen werden.*

Diese Aussagen zeigen eine deutliche Verbesserung der AV im Vergleich zu dem RV. Quantitative Aussagen zu diesen Verbesserungen wurden im vorherigen Kapitel bereits abgeleitet. Eine bestätigte qualitative Bevorzugung ist mit der quantitativen (absoluten) Verbesserung in Abbildung 92 dargestellt. Dabei stellen die ersten Balken ausschließlich die relative Zustimmung einer Verbesserung ohne dessen Quantifizierung dar. Es zeigt sich, dass in allen AV eine relative Verbesserung formuliert wurde und diese

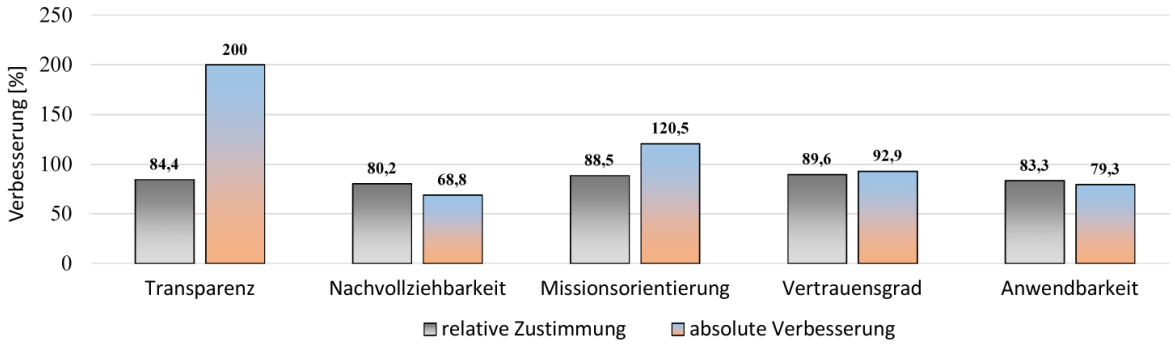


Abbildung 92: Aufstellung der quantitativen und qualitativen Verbesserung. *Die qualitativen Aussagen geben lediglich eine Aussage über die Zustimmung einer Verbesserung. Gleichwohl können mit diesen relativen Aussagen die quantifizierten Verbesserungen überprüft werden. Durch die gleiche Ausrichtung der Balken kann damit die Konsistenz der Antworten nachgewiesen werden.*

ebenfalls in einem absoluten Vergleich (siehe Abbildung 87 unten) quantifiziert werden konnte. Damit konnte die Konsistenz der Antworten der VP überprüft und bestätigt werden.

6.3.3.4 Weitere Fähigkeiten von DESFACE

Neben der Bewertung von Luftfahrzeugen sollte *DESFACE* ebenfalls für die Ableitung optimaler Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* genutzt werden. Dazu wurden mit Unterstützung von *DESFACE* optimale Ausprägungen für die einzelnen Luftfahrzeuge abgeleitet. Die Ausprägungen werden dabei dahingehend optimiert, dass ein betrachtetes Luftfahrzeug ein höheres Gesamtpotential (SPP) zur Erfüllung der Mission erlangt. Die Ergebnisse der Validierung in diesem Bereich sind in Abbildung 93 dargestellt. Die VP bewerten das entwickelte Vorgehen als einsetzbar (Median = 2,2) und sind der Meinung, dass eine effiziente Ableitung belastbarer Anforderungen im Rahmen des *Requirements Engineering* unterstützt wird (Median = 2,1).

Diese Bewertung wird durch das *Semantische Differential* in Abbildung 94 bestätigt. *DESFACE* wird als sinnvoll (Median = 1,37) und empfehlenswert (Median = 1,2) für die Ableitung von Anforderungen luftgestützter Systeme eingeschätzt. Die Applikation ist auch für diesen Anwendungsfall gut umgesetzt (Median = 1,37). Damit konnte *DESFACE* auch für den weiterführenden *Use Case* (siehe Kapitel 2.3.2) validiert und dessen Potential zum Einsatz im Entwurfsprozess hervorgehoben werden.

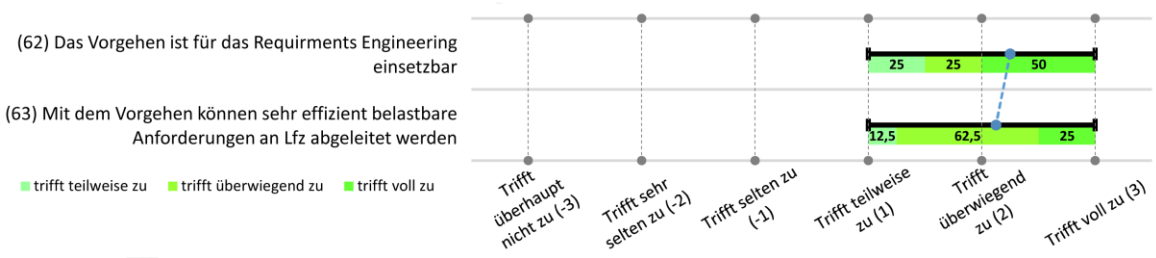


Abbildung 93: Potential für den Einsatz von *DESFACE* im *Requirements Engineering*. *DESFACE wird die Fähigkeit zugesprochen, die effiziente Ableitung belastbarer Anforderungen zu unterstützen.*

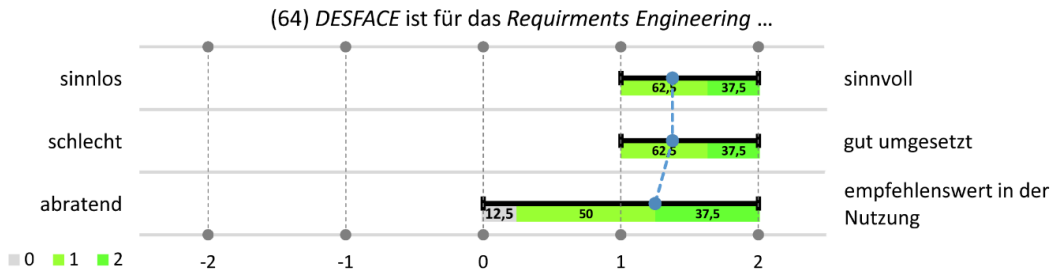


Abbildung 94: *Semantisches Differential* für den Einsatz von *DESFACE* zur Ableitung von Systemanforderungen im Entwurfsprozess. *Die Ergebnisse zeigen, dass DESFACE ein Potential für die Ableitung von Anforderungen durch die VP zugesprochen wird.*

6.4 Zusammenfassung der Evaluierung

Wie in der Zielsetzung dieser Arbeit (Kapitel 1.1) formuliert, sollte ein DSS entwickelt werden, welches folgende Anwendung unterstützt:

- Missionsorientierte, ganzheitliche Bewertung von Luftfahrzeugen
- Analyse der Ergebnisse (Unsicherheiten, Robustheit, Signifikanz, Korrelationen)
- Ableitung optimaler Ausprägungen zur Unterstützung des *Requirements Engineering*

In Kapitel 2.3.2 wurden die Forderung an ein solches DSS definiert, welche als *abhängige Variable* (AV) bei der Validierung in diesem Kapitel überprüft wurden. Diese AV wurden mit *Items* aus Fragebögen adressiert, wodurch deren Ausprägungen für zwei betrachtete Vorgehen ermittelt werden konnten. Diese waren ein Referenzvorgehen – wie es derzeit bei Beschaffungsvorhaben eingesetzt und genutzt wird – sowie das in dieser Arbeit entwickelte *DESFACE*. Beide Verfahren wurden an einer fiktiven Auswahlentscheidung angewandt und durch die Versuchspersonen mittels Fragebögen bewertet. Daraus konnte eine absolute Bewertung beider Vorgehen sowie eine daraus resultierende Verbesserung hinsichtlich der AV ermittelt werden. Dieser absolute Vergleich beider Vorgehen zeigt eine signifikante Verbesserung aller betrachteten AV für *DESFACE*. Zusätzlich dazu wurden diese Verbesserungen mit relativen Bewertungen überprüft und es konnte eine valide Konsistenz festgestellt werden.

Neben dem Nutzen wurde der Aufwand sowohl subjektiv als auch objektiv quantifiziert, welcher bei *DESFACE* deutlich höher ist als bei dem Referenzvorgehen. Der zeitliche Bedarf ist mehr als viermal so hoch. Dies hat allerdings keine negativen Auswirkungen auf die *Akzeptanz* von *DESFACE*. Durch den gestiegenen Nutzen konnte ebenfalls das Nutzen/Kosten Verhältnis um den Faktor 4 gesteigert werden, was die *Akzeptanz* trotz des gestiegenen Aufwandes erhöht.

Weiterhin wurde die Eignung von *DESFACE* für die Ableitung von Anforderung im Entwicklungsprozess ermittelt. Diese Eignung wurde durch die VP zugesprochen und *DESFACE* als sinnvolle und empfehlenswerte Möglichkeit zur Ableitung solcher Anforderungen eingeschätzt. In der Validierungskampagne lag das Hauptaugenmerk auf der Fähigkeitsbewertung von *DESFACE* zur Bewertung von Luftfahrzeugen, so dass der weiterführende *Use Case* zur Ableitung und Definition von Anforderungen weiterführend detaillierter zu untersuchen ist.

Es ist hervorzuheben, dass die Anwendung von *DESFACE* für die Unterstützung von Systembewertungen sowie das *Requirements Engineering* vereinfacht überprüft wurde. Es wurden ausschließlich plattformspezifische Kriterien betrachtet, wobei Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Plattformen wie bspw. Taktiken nicht berücksichtigt wurden. Die Methodik ist für die Bewertung einzelner Luftfahrzeuge entwickelt worden, ohne Berücksichtigung verteilter Entitäten in einem Wirk- und Aufklärungsverbund. Mit dem entwickelten Vorgehen können einzelne luftgestützte Plattformen und Systeme miteinander verglichen und bewertet werden, was in diesem Kapitel experimentell bestätigt wurde. Für die Betrachtung von Verbänden und Teams ist das vorgestellte Vorgehen entsprechend zu erweitern (siehe Kapitel 7.2).

In der Verifikation (Kapitel 6.2) wurde ein Vergleich zwischen den Datensätzen der Luftfahrzeuge, den Berechnungsmodulen und den MCDA- Methoden mit Referenzergebnissen durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Referenz mit marginalen Abweichungen erreicht werden konnten. Damit konnten Implementierungsfehler (Codeverifikation) oder Fehler im Ergebnis (Lösungsverifikation) ausgeschlossen werden.

Wenn ein DSS richtig implementiert und genutzt wird, kann dieses sowohl die Ergebnisse als auch den Prozess verbessern (Adelman 1992). Diese Verbesserung sowohl im Prozess selbst als auch im Ergebnis konnte für die plattformspezifische Bewertung (1 vs. 1, siehe Kapitel 2.1.1.2) bestätigt werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Schwerpunkt dieser Arbeit war die Konzipierung und prototypische Implementierung eines Entscheidungsunterstützungssystems (DSS) für die missionsorientierte Bewertung luftgestützter Systeme zur Ableitung einer transparenten und reproduzierbaren Auswahlentscheidung. Die Motivation dazu lässt sich aus dem Gegenspiel zwischen den begrenzten kognitiven Fähigkeiten des Menschen zur Erfassung komplexer Situationen und den Charakteristika von systemischen Bewertungsaufgaben in der Luftfahrt – insbesondere der damit einhergehenden Komplexität – ableiten. Aus diesem Hintergrund kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Entscheidungsträger (ET) zur Bearbeitung solcher komplexen Bewertungsaufgaben ein geeignetes Unterstützungssystem benötigen, welches den Prozess strukturiert und die notwendigen methodischen Werkzeuge bereitstellt. Ein solches System wurde im Rahmen dieser Arbeit konzeptionell entwickelt und als Applikation bzw. Werkzeug implementiert.

Ausgehend von dieser Zielsetzung wurden die bestehenden Forschungsansätze gesichtet und mit den aufgestellten Konzeptanforderungen gegenübergestellt. Es konnte festgestellt werden, dass eine systematische Modellierung von Entscheidungsunterstützungssystemen (DSS) zwar gefordert, allerdings bis zu diesem Zeitpunkt kaum Beachtung gefunden hat. Es existieren keine ganzheitlichen Ansätze, welche solch eine missionsorientierte Betrachtung und eine nachvollziehbare Aufbereitung des Ergebnisses anstreben und damit ermöglichen.

Als Lösungsansatz scheint ein Konzept angezeigt, welches aus einem *Makro-Konzept* und einem domänenspezifischen *Mikro-Konzept* besteht. Das *Makro-Konzept* definiert das Vorgehensmodell des DSS, während das *Mikro-Konzept* die Datenbasis für die Systembewertung methodisch ableitet, strukturiert und verwaltet. Zunächst erfolgte die theoretische Ableitung des Vorgehensmodells mit den einzelnen Teilprozessen. Das *Makro-Konzept* beinhaltet die Formulierung der Nutzenabsicht sowie der Randbedingungen für den Bewertungsprozess. Weiterhin enthält es Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie, um ein Bewertungsergebnis aus konfliktären Zielsystemen abzuleiten und darauf aufbauend weitere Untersuchungen wie Sensitivitätsanalysen oder Optimierungen der Kriterienausprägungen durchzuführen. Mit dem *Mikro-Konzept* wurde ein methodischer Baukasten entwickelt, um ausgehend von der Nutzenabsicht die explizite Datenbasis bestehend aus einer deskriptiven Kriterienstruktur und entscheidungsrelevanten Parametern für ein vollständiges Zielsystem abzuleiten. Darunter zählen neben den Kriterien selbst die Wertvorstellungen des ET. Zur Strukturierung der Vielzahl an Daten und zur Ermittlung bzw. Festlegung weiterer Relationen wurde die bestehende Methode des *House of Quality* modifiziert. Das so entwickelte *House of Metrics* ermöglicht eine hierarchische, strukturierte Ablage der Daten und berücksichtigt wichtige Relationen zwischen den Fähigkeiten oder Kriterien wie

Wechselwirkungen oder Abhängigkeiten. Damit dient das *HoM* als Datenbasis für den Bewertungsprozess und kann als A-Priori Wissen dem Entscheidungsprozess beigestellt werden. Ausgehend von dem *HoM* wird eine Quantifizierung der Kriterien vorgenommen und deren Ausprägung mit entsprechenden Berechnungsmodulen bestimmt. Zur objektiven Ermittlung eines Bewertungsergebnisses wurden unterschiedliche Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie analysiert und bewertet.

Daraus ergeben sich mehrere Anwendungen für den entwickelten Ansatz eines DSS. Diese sind die missionsorientierte Bewertung luftgestützter Systeme, die Analyse der Bewertungsergebnisse, die statistische Ableitung von Korrelationen zwischen den Fähigkeiten/Kriterien und dem Systempotential sowie die Ableitung optimaler Systemparameter im Rahmen des Anforderungsmanagements (*Requirements Engineering*). Neben der schnellen, automatisierten Analyse von Informationen beim Entscheidungsprozess liegt der Nutzen des DSS ebenfalls in der Möglichkeit der klaren Darstellung und Rechtfertigung der Ergebnisse begründet. Schwerpunkt der Bewertung komplexer luftgestützter Systeme ist die Analyse der vernetzten Ursache-Wirkungs-Beziehungen technischer und wirtschaftlicher Faktoren. Dabei werden in dieser Arbeit keine ergonomischen, psychologischen, politischen oder juristischen Faktoren betrachtet. Gleichwohl kann die Bewertungssystematik hinsichtlich dieser Faktoren ergänzt werden, falls diese im Rahmen umfassender Analysen bei der Bewertung zu berücksichtigen sind.

Im Anschluss an die Konzeptionierung wurde der entwickelte Ansatz in eine softwaregestützte Applikation *DESFACE* (***DE**cision **S**upport **F**ramework for **A**ir**C**raft **E**valuation*) prototypisch implementiert. Diese enthält die Module des Vorgehensmodells, die entsprechenden methodischen Bearbeitungsroutinen sowie die Berechnungsmodule für die Ausprägungsermittlung der Kriterien. Zusätzlich wurde eine Wissensbasis mit entsprechenden Experten in mehreren Durchgängen der Wissensakquisition aufgebaut, welches als *A-Priori* Wissen dem Bewertungsprozess beigestellt wurde. Die implementierten MCDA- Methoden, die Datensätze der Luftfahrzeuge sowie die Berechnungsumgebungen wurden anhand von Referenzdaten verifiziert. Für die abschließende Validierung wurde die implementierte Applikation sowie ein Referenzvorgehen am Beispiel einer fiktiven Auswahlentscheidung durch Experten angewandt und validiert. Dabei konnte eine relative Verbesserung der *Akzeptanz* (*Qualität* und *Anwendbarkeit*) von 112% ermittelt werden. Gleichzeitig ist der Aufwand deutlich gestiegen, was allerdings durch eine Steigerung des Nutzen/Aufwand Verhältnis um den Faktor 4 relativiert wird. Damit konnte gezeigt werden, dass *DESFACE* ein möglicher Ansatz zur Umsetzung eines DSS ist, welcher eine *missionsorientierte*, *transparente*, *nachvollziehbare*, *robuste* und *objektive* Bewertung luftgestützter Systeme ermöglicht und unterstützt.

7.1 Technisch-wissenschaftliche Beiträge

In diesem Kapitel sollen die Beiträge dieser Arbeit noch einmal explizit zusammengefasst und herausgestellt werden. Es wurden ein konzeptueller Ansatz sowie ein eingebettetes Methodenrepertoire für ein DSS zur Bewertung luftgestützter Systeme vorgeschlagen, welcher/welches:

- erstmals eine Verknüpfung von Missionen und deskriptiven Kriterien über Fähigkeitsbausteine herstellt. (Morawietz et al. 2015)

- eine ausführlichere Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen Fähigkeiten und Kriterien mit Hilfe der Pareto-Optimalität sicherstellt (Morawietz et al. 2017, 2016)
- ein umfassenderes, missionsorientiertes *A-Priori* Wissen aufbaut und dieses dem implementierten DSS für die Nutzung beistellt.
- erstmals eine Datenbasis bestehend aus Fähigkeiten bzw. Kriterien inkl. deren Wechselwirkungen und Abhängigkeiten sowie Wertvorstellungen (Gewichtung und Wertfunktionen) mit dem *House of Metrics* strukturiert (Morawietz et al. 2017), missionsspezifisch aufbaut und verwaltet.
- eine umfassende Steigerung der *Plausibilität* und *Nachvollziehbarkeit* für den ET und damit eine signifikante Erhöhung der *Qualität* sowie der *Akzeptanz* des Vorgehens und des Ergebnisses verzeichnen kann (Morawietz et al. 2018), was schlussendlich in einem höheren Vertrauensgrad in das Ergebnis resultiert.

Damit konnte ein Ansatz für ein DSS konzipiert und umgesetzt werden, welcher dem ET ein Werkzeug zur Verfügung stellt, mit dem sowohl Bewertungen als auch Auswahlentscheidungen strukturierter abgeleitet und die Ergebnisse nachvollziehbarer aufbereitet werden können (siehe Kapitel 6.4). Damit kann der ET trotz der Komplexität der Bewertungsaufgabe ein signifikant höheres Maß an Vertrauen in die Ergebnisse gewinnen und damit wichtige Auswahlentscheidungen legitimieren.

7.2 Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit ist ein weiterer Ausbau der Wissensbasis notwendig, um weitere Datenbasen für Fähigkeitsbausteine zu generieren. Durch die Versuchspersonen und Experten wurde *DESFACE* ein großes Potential auch für die Unterstützung anderer Auswahlentscheidungen zugesprochen, so dass das *Mikro-Konzept* für diese Bereiche entsprechend auszubauen ist. Damit verbunden sind auch die Weiterentwicklung der implementierten Berechnungsmodule sowie die Implementierung von Simulationsumgebungen.

In Verbindung damit steht ein weiterer Anknüpfungspunkt für zukünftige Arbeiten, welcher die Abbildung von Systemen im Wirk- und Aufklärungsverbund darstellt. Durch die technologische Weiterentwicklung ist zunehmend – speziell im militärischen Bereich – der Trend erkennbar, dass Entitäten mit verteilten Fähigkeiten zur Erfüllung einer übergeordneten Aufgabe zusammen eingesetzt werden. Zukünftig sind zur holistischen Bewertung eines Verbundes Methoden und Verfahren zu entwickeln, mit denen die spezifische Leistungsfähigkeit missionsrelevanter Systeme wie Sensoren, Missionsrechnersysteme und Kommunikationssysteme von Fluggeräten im Sinne eines Verbunds aus Einzelsystemen (*System of Systems*) berücksichtigt werden. Bei dem Verbund von Einzelsystemen kann es sich sowohl um bemannte wie unbemannte Systeme handeln. Die Zusammensetzung des Verbundes kann sowohl homogen – z.B. gleiche Flugzeuge mit gleicher Sensorik als auch heterogen – z.B. Luftfahrzeuge mit unterschiedlicher Sensorik – sein. Dazu sind weitere Aspekte wie bspw. die Energiebilanz oder die Struktur des Datenverbundes auf Relevanz zu prüfen und in das Modell zu integrieren.

Im Zusammenhang damit ist weiterführend zu untersuchen, wo die Grenzen zwischen expliziten und impliziten Verfahren liegen und wann diese Verfahren jeweils anzuwenden sind (abhängig von der Anzahl der zu bewertenden Entitäten). Welche notwendigen Bedingungen müssen erfüllt sein, damit ein

explizites bzw. implizites Verfahren genutzt werden kann bzw. muss. Dabei ist auch die Frage zu klären, ab welcher Komplexität der Bewertungsaufgabe keine analytische oder explizite Betrachtung mehr möglich ist und damit zwingend implizite Verfahren zu nutzen sind. Wie können Kombinationen daraus – wie bspw. *DESFACE* – gewinnbringend für die Bewertung von Verbänden aus verschiedenen Entitäten auf Kampagnenebene (siehe Abbildung 4 in Kapitel 2.1.1.3) eingesetzt werden? Dazu sind weitere detaillierte Untersuchungen anzustellen, wie sich solche Ansätze für die Bewertung von Wirk- und Aufklärungsverbänden mit verteilten Entitäten gegenseitig ergänzen können.

8. Literatur

Adelman, Leonard (1992): Evaluating decision support and expert systems. New York: Wiley & Sons (Wiley series in systems engineering).

Afshari, Ali Reza; Mojahed, M.; Yusuff; Rosnah Mohd. (2010): Simple Additive Weighting Approach to Personnel Selection Problem. In: *International Journal of Innovation and Technology Management*. DOI: 10.7763/IJIMT.2010.V1.89.

Alexandrov, Natalia (2005): Editorial—Multidisciplinary Design Optimization. In: *Optimization and Engineering* 6 (1), S. 5–7. DOI: 10.1023/B:OPTE.0000048533.43561.57.

Armstrong, J.Scott; Denniston, William B.; Gordon, Matt M. (1975): The use of the decomposition principle in making judgments. In: *Organizational Behavior and Human Performance* 14 (2), S. 257–263. DOI: 10.1016/0030-5073(75)90028-8.

Ascough, James.; Deer-Ascough, Lois.; Shaffer, Marvin; Hanson, Jonathan (1997): Subjective evaluation of decision support systems using multiattribute decision making (MADM). In: S. A. Swaify und D. S. Yakowitz (Hg.): Multiple Objective Decision Making for Land, Water and Environmental Management. Proceedings of the First International Conference on Multiple Objective Decision Support Systems (MODSS. Honolulu, Hawaii, 296-280.

Augustine, Norman R. (2005): Augustine's laws. 6th ed. Norwood Mass.: Books24x7.com.

Backhaus, Klaus (2010): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 13. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).

Ball, Robert E. (2003): The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design. 2nd ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA education series).

Ballou, Donald P.; Mohan, Lakshmi (1981): A decision model for evaluating transit pricing policies. In: *Transportation Research Part A: General* 15 (2), S. 125–138. DOI: 10.1016/0191-2607(81)90078-9.

Bamberg, Günter; Coenenberg, Adolf Gerhard; Krapp, Michael (2012): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 14. überarb. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Kurzlehrbücher).

Bana e Costa, Carlos A.; Ensslin, Leonardo; Cornêa, Émerson C.; (Keine Angabe) (1999): Decision Support Systems in action. Integrated application in a multicriteria decision aid process. In: *European Journal of Operational Research* 113 (2), S. 315–335. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00219-7.

Bandte, Oliver (2000): A Probabilistic Multi-Criteria Decision Making Technique for Conceptual and Preliminary Aerospace Systems Design. Georgia (Dissertation).

Banville, Claude; Landry, Maurice; Martel, Jean-Marc; Boulaire, Christèle (1998): A stakeholder approach to MCDA. In: *Syst. Res.* 15 (1), S. 15–32. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1743(199801/02)15.

Baron, Jonathan (2008): Normative Models of Judgment and Decision Making. In: Derek J. Koehler (Hg.): Blackwell Handbook of Judgment and Decision Making. 2004; published online 2008. Chichester: Wiley, S. 19–36.

Bartusseck, Sabine Margret (2008): Ein regelbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für Maßnahmen zur Gewässerstrukturverbesserung. Aachen (Dissertation).

Beisswenger, Andreas (2016): Anatomie strategischer Entscheidungen. Komplexitat im Unternehmen verstehen, analysieren und meistern: Gabler.

Belton, Valerie; Stewart, Theodor J. (2002): Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach. Boston, MA: Springer US.

Belton, Valerie; Vickers, Stephen (1990): Use of a Simple Multi-Attribute Value Function Incorporating Visual Interactive Sensitivity Analysis for Multiple Criteria Decision Making. In: Carlos A. Bana e Costa (Hg.): Readings in Multiple Criteria Decision Aid. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 319–334.

Bertsch, Valentin (2007): Uncertainly Handling in Multi-Attribute Decision Support for Industrial Risk Management. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Karlsruhe. Karlsruhe (Dissertation).

Bijl, Piet; Hogervorst, Maarten A.; Valeton, J. M. (2002): TOD, NVTherm, and TRM3 model calculations. A comparison. In: Roger Appleby, Gerald C. Holst und David A. Wikner (Hg.): Infrared and Passive Millimeter-wave Imaging Systems. Design, Analysis, Modeling, and Testing. AeroSense 2002. Orlando, FL, Monday 1 April 2002. 4719. Aufl.: SPIE (SPIE Proceedings, 4719), S. 51.

Binmore, Ken (2011): Rational decisions. 4. Aufl. Princeton, N.J. (The Gorman lectures in economics).

Blackwell, H. R. (1946): Contrast thresholds of the human eye. In: *J. Opt. Soc. Am.* 36 (11), S. 624–643.

Blasch, Erik P.; Pribilski, Mike; Daughtery, Bryan; Roscoe, Brian; Gunsett, Josh (2004): Fusion Metrics for Dynamic Situation Analysis. In: *Proceedings of the SPIE* (5429), S. 428–438. DOI: 10.1117/12.542902.

Boccardo, Piero; Chiabrando, Filiberto; Dutto, Furio; Tonolo, Fabio Giulio; Lingua, Andrea (2015): UAV Deployment Exercise for Mapping Purposes: Evaluation of Emergency Response Applications. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15 (7), S. 15717–15737. DOI: 10.3390/s150715717.

Bogaschewsky, Ronald; Essig, Michael; Lasch, Rainer; Stölzle, Wolfgang (2010): Supply Management Research. Aktuelle Forschungsergebnisse 2010. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden (Advanced studies in supply management, 3).

Bohnke, Daniel; Nagel, Bjorn; Gollnick, Volker (2011): An approach to multi-fidelity in conceptual aircraft design in distributed design environments. In: Aerospace Conference, 2011 IEEE. Date, 5-12 March

2011. 2011 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA, 5/3/2011 - 12/3/2011. [Piscataway, N.J.]: IEEE, S. 1–10.

Bond, Samuel D.; Carlson, Kurt A.; Keeney, Ralph L. (2008): Generating Objectives. Can Decision Makers Articulate What They Want? In: *Management Science* 54 (1), S. 56–70. DOI: 10.1287/mnsc.1070.0754.

Bonnefoy, Philippe A.; Burdette, Graham; Carroll, Thomas; Hansman, John R.; Hileman, James; Isley, Steve et al. (2010): Assessment of CO2 Emission Metrics for a Commercial Aircraft Certification Requirement. Partnership for AiR Transportation Noise and Emissions Reduction (REPORT NO. PARTNER-COE-2011-002).

Boon, M. A.; Drijfhout, A. P.; Tesfamichael, S. (2006): Comparison of a Fixed-Wing and Multi-Rotor UAV for Environmental Mapping Applications. A Case Study. Department of Geography, Environmental Management and Energy Studies.

Bortz, Jürgen; Döring, Nicola (2015): Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Mit 87 Tabellen. 4., überarb. Aufl., limitierte Sonderausg. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

Boukhayma, Khaoula; ElManouar, Abdellah (2015): Evaluating decision support systems. In: Ajith Abraham (Hg.): Proceedings of the 2015 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA). Marrakesh, Morocco, December 14-16, 2015. 2015 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA). Marrakech, Morocco. Piscataway, NJ: IEEE, S. 404–408.

Bradley, Justin M.; Atkins, Ella M. (2014): Cyber–Physical Optimization for Unmanned Aircraft Systems. In: *Journal of Aerospace Information Systems* 11 (1), S. 48–60. DOI: 10.2514/1.I010105.

Brandt, Steven A. (2015): Introduction to Aeronautics. A Design Perspective. Third edition. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc (AIAA education series).

Branke, Jürgen (2008): Multiobjective Optimization. Interactive and Evolutionary Approaches. Berlin: Springer-Verlag (LNCS sublibrary. Theoretical computer science and general issues, SL 1).

Brans, Jean-Pierre; Mareschal, Bertrand (2005): Promethee Methods. In: José Figueira, Salvatore Greco und Matthias Ehrgott (Hg.): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys, Bd. 78. New York, N.Y.: Springer (International Series in Operations Research & Management Science), S. 163–186.

Brauchlin, Emil; Heene, Robert (1995): Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik. Eine Einführung. 4 vollst. überarb. Aufl. Bern: P. Haupt (Uni-Taschenbücher, 1738).

Brauer, W.; Goos, G.; Puppe, Frank (1988): Einführung in Expertensysteme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Breiing, Alois; Knosala, Ryszard (1997): Bewerten technischer Systeme. Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Berlin, Heidelberg: Springer.

Brown, Rex V. (1989): Toward a prescriptive science and technology of decision aiding. In: *Ann Oper Res* 19 (1), S. 465–483. DOI: 10.1007/BF02283535.

Bruno, Giuseppe; Esposito, Emilio; Genovese, Andrea (2015): A model for aircraft evaluation to support strategic decisions. In: *Expert Systems with Applications* 42 (13), S. 5580–5590. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.02.054.

Buchanan, John T.; Henig, Erez J.; Henig, Mordecai I. (1998): Objectivity and Subjectivity in the Decision Making Process. In: *Annals of Operations Research* (80), S. 333–345.

Bundesministerium der Verteidigung (2012): Costumer Product Management (nov.). (Novellierung des CPM 2010 auf Grundlage der Konzeption des neuen Ausrüstungs- und Nutzungsprozesses). BMVg AIN I 1. Bonn (Az 79-01-01).

Bundesministerium der Verteidigung (Hg.) (2016): Lebenswegkostenmanagement in der Bundeswehr über alle CPM-Phasen. Life Cycle Cost Management (LCCM).

Buonanno, Michael; Mavris, Dimitri N. (2005): A New Method for Aircraft Concept Selection Using Multicriteria Interactive Genetic Algorithms. In: 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, zuletzt geprüft am 10.11.2016.

Burstein, Frada; Holsapple, Clyde (Hg.) (2008): Handbook on Decision Support Systems 2. Variations. New York: Springer (International Handbooks on Information Systems Ser).

Carlsson, C.; Turban, E. (2002): DSS. Directions for the next decade. In: *Decision Support Systems* 33 (2), S. 105–110. DOI: 10.1016/S0167-9236(01)00137-3.

Carson, J. S. (1989): Verification And Validation. A Consultant's Perspective. In: Simulation Conference Proceedings, 1989. Winter. 1989 Winter Simulation. Washington, DC, December 4-6, 1989: IEEE, S. 552–558.

Cervone, H. Frank (2009): Applied digital library project management. In: *OCLC Systems & Services* 25 (4), S. 228–232. DOI: 10.1108/10650750911001815.

Chang, Yu-Hern; Yeh, Chung-Hsing (2001): Evaluating airline competitiveness using multiattribute decision making. In: *Omega* 29 (5), S. 405–415. DOI: 10.1016/S0305-0483(01)00032-9.

Charness, Gary; Gneezy, Uri; Kuhn, Michael A. (2012): Experimental methods. Between-subject and within-subject design. In: *Journal of Economic Behavior & Organization* 81 (1), S. 1–8. DOI: 10.1016/j.jebo.2011.08.009.

Chen, Guo; Yingming, Han; Nüßer, Hans Gustav; Wilken, Dieter (1998): A Method of Evaluating Civil Aircraft Market Adequacy. In: DGLR-Workshop: Bewertung von Flugzeugen. DOC, LCC, Kommunalität, Reichweitenflexibilität etc. Wie lautet die neue Formel der Flugzeugbewertung? DGLR: Bewertung von Flugzeugen. Garching, 26.10.1998. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.

Chen, Ye (2006): Multiple Criteria Decision Analysis. Classification Problems and Solutions. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada (Dissertation).

Choi, Youngjun; Payan, Alexia P.; Briceno, Simon I.; Mavris, Dimitri N. (2018): A Framework for Unmanned Aerial Systems Selection and Trajectory Generation for Imaging Service Missions. In: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. 2018 Aviation Technology, Integration,

and Operations Conference. Atlanta, Georgia. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, S. 129.

Choo, Eng U.; Schoner, Bertram; Wedley, William C. (1999): Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. In: *Computers & Industrial Engineering* 37 (3), S. 527–541. DOI: 10.1016/S0360-8352(00)00019-X.

Christensen-Szalanski, Jay J.J; Willham, Cynthia Fobian (1991): The hindsight bias. A meta-analysis. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 48 (1), S. 147–168. DOI: 10.1016/0749-5978(91)90010-Q.

Clarke, David; Rivett, B. H. Patrick (1978): A Structural Mapping Approach to Complex Decision-Making. In: *J Oper Res Soc* 29 (2), S. 113–128. DOI: 10.1057/jors.1978.26.

Cohen, Luo (1995): Quality Function Deployment. How to make QFD work for you. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing (Engineering process improvment series).

Čokorilo, Olja; Gvozdenović, Slobodan; Mirosavljević, Petar; Vasov, Ljubiša (2010): Multi attribute decision making. Assessing the technological and operational parameters of an aircraft. In: *Transport* 25 (4), S. 352–356. DOI: 10.3846/transport.2010.43.

Corsten, Hans; Corsten, Hilde; Sartor, Carsten (2015): Operations Research. Eine problemorientierte Einführung. München: Verlag Franz Vahlen (WiSo Kurzlehrbücher Reihe Betriebswirtschaft).

Coutinho-Rodrigues, João; Simão, Ana; Antunes, Carlos Henggeler (2011): A GIS-based Multicriteria Spatial Decision Support System for Planning Urban Infrastructures. In: *Decision Support Systems* 51 (3), S. 720–726. DOI: 10.1016/j.dss.2011.02.010.

COX, BRIAN; Downing, David R. (1992): Evaluation of functional agility metrics for fighter class aircraft. In: Astrodynamics Conference. Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. Astrodynamics Conference. Hilton Head Island,SC,U.S.A, 10 August 1992 - 12 August 1992. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Crasemann, C.; Krasemann, H. (1988): Der Wissens-Ingenieur - ein neuer Hut auf altem Kopf. In: *Informatik-Spektrum* (11), S. 43–48.

Curran, Richard; Beelearts, W.; Abu-Kias, T.; Sprengers, Y. LJ. (2011): Value Operations Methodology (VOM) applied to medium-range passenger airliner design. In: Journal of Aerospace Operations.

Curran, Richard; van Blokland, Wouter Beelaerts; Abu-Kias, T.; Van der Zwet, P. N. C. (2010): A Value Operations Methodology for Value Driven Design: Medium Range Passenger Airliner Validation. In: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, 4.-7. January 2010.

Delano, Gwen; Parnell, Gregory S.; Smith, Charles; Vance, Matt (2000): Quality function deployment and decision analysis. A R&D case study. In: *Int Jrnl of Op & Prod Mnagemnt* 20 (5), S. 591–609. DOI: 10.1108/01443570010318959.

DeLaurentis, Daniel A.; Mavris, Dimitri N.; Schrage, Daniel P. (1996): System Synthesis in Preliminary Aircraft Design using Statistical Methods. In: 20th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 8-13 September 1996. Sorento.

Denner, Christian (2009): Die Psychologie strategischen Entscheidens. Wie der Verstand unsere Entscheidungen manipuliert. Marburg: Tectum-Verl.

DeSanctis, Gerardine; Gallupe, R. Brent (1987): A Foundation for the Study of Group Decision Support Systems. In: *Management Science* 33 (5), S. 589–609. DOI: 10.1287/mnsc.33.5.589.

Dickerson, Charles E.; Mavris, Dimitri N. (2011): Relational Oriented Systems Engineering (ROSE): Preliminary report. In: 2011 6th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Albuquerque, NM, USA, S. 149–154.

Dieter, George Ellwood; Schmidt, Linda C. (2013): Engineering design. 5th ed. New York: McGraw-Hill.

Dinkelbach, Werner (1982): Entscheidungsmodelle. Berlin: Walter de Gruyter (De Gruyter Lehrbuch).

Dirks, Gregor Achim; Meller, Frank (2000): Multidiciplinary Design Optimization. Enhanced Methodology for Aircraft and Technology Evaluation. In: 8th AIAA/USAF/ISSMO Symposium on Multidiciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, CA, 6.-8. September 2000.

Dogson, John; Spackman, Michael; Pearman Alan; Phillips, Lawrence (2001): DTLR multi-criteria analysis manual. National Economic Research Associates (Report).

Dörfler-Dierken, Angelika; Portugall, Gerd (2010): Friedensethik und Sicherheitspolitik. Weissbuch 2006 und EKD-Friedensdenkschrift 2007 in der Diskussion. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Schriftenreihe des Sozialwissenschaftlichen Instituts der Bundeswehr, Bd. 8).

Döring, Nicola; Bortz, Jürgen (2016): Forschungsmethoden und Evaluation. in den Sozial- und Humanwissenschaften. 5., überarb. Aufl., Nachdr. Heidelberg: Springer-Medizin-Verl. (Springer-Lehrbuch Bachelor, Master).

Dožić, Slavica; Kalić, Milica (2014): An AHP Approach to Aircraft Selection Process. In: *Transportation Research Procedia* 3, S. 165–174. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.102.

Duncan, Scott J.; Griendling, Kelly; Mavris, Dimitri N. (2011): An assessment of ROSETTA for smart electricity grid system-of-systems design. In: 2011 6th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Albuquerque, NM, USA, S. 231–236.

Durst, Phillip J.; Gray, Wendell; Nikitenko, Agris; Caetano, Joao; Trentini, Michael; King, Roger (2014): A Framework for Predicting the Mission-Specific Performance of Autonomous Unmanned Systems. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS 2014. Chicago, IL, USA. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1962–1969.

Durst, Phillip J.; Gray, Wendell; Trentini, Michael (2013): Development of a Non-Contextual Model for Determining the Autonomy Level of Intelligent Unmanned Systems. In: Robert E. Karlsen, Douglas W. Gage, Charles M. Shoemaker und Grant R. Gerhart (Hg.): Unmanned Systems Technology. SPIE Defense,

Security, and Sensing. Baltimore, Maryland, USA, Monday 29 April 2013: SPIE (SPIE Proceedings), S. 874111.

Dyer, James S.; Sarin, Rakesh K. (1979): Measurable Multiattribute Value Functions. In: *Operations Research* 27 (4), S. 810–822. DOI: 10.1287/opre.27.4.810.

Eder, W. Ernst (1998): Design Modeling-A Design Science Approach (and Why Does Industry Not Use It?). In: *Journal of Engineering Design* 9 (4), S. 355–371. DOI: 10.1080/095448298261499.

Edwards, Allen Louis (1980): Versuchsplanung in der psychologischen Forschung. 3. Aufl. Frankfurt a.M.: Fachbuchhandlung für Psychologie (Reprints Psychologie, 13).

Edwards, Ward; Miles, Ralph F.; Winterfeldt, Detlov von (2007): Advances in Decision Analysis. From Foundations to Applications. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Edwards, Ward; Newman, J. R. (1998): Multiattribute evaluation. [Nachdr.]. Newbury Park, Calif. [u.a.]: Sage Publ (Quantitative applications in the social sciences, 26).

Eekhoff, Johann; Heidemann, Claus; Strassert, Günter (1981): Kritik der Nutzwertanalyse. drei Beiträge. 11. Aufl. Hg. v. Institut für Regionalwissenschaften der Universität Karlsruhe. Karlsruhe (Diskussionspapier).

Eid, Michael; Gollwitzer, Mario; Schmitt, Manfred (2015): Statistik und Forschungsmethoden. Mit Online-Materialien. 5., korrigierte auflage. Weinheim, Basel: Beltz.

Eisenführ, Franz; Langer, Thomas; Weber, Martin (2010): Rationales Entscheiden. 5., überarb. u. erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

English, J.Morley; Kernan, Gerard L. (1976): The prediction of air travel and aircraft technology to the year 2000 using the Delphi method. In: *Transportation Research* 10 (1), S. 1–8. DOI: 10.1016/0041-1647(76)90094-0.

Eom, Hyun B.; Lee, Sang M. (1990): A Survey of Decision Support System Applications (1971–April 1988). In: *Interfaces* 20 (3), S. 65–79. DOI: 10.1287/inte.20.3.65.

Er, M. C. (1988): Decision Support Systems. A summary, problems, and future trends. In: *Decision Support Systems* 4 (3), S. 355–363. DOI: 10.1016/0167-9236(88)90022-X.

Farquhar, Peter H.; Keller, L. Robin (1989): Preference intensity measurement. In: *Ann Oper Res* 19 (1), S. 205–217. DOI: 10.1007/BF02283521.

Farr, Brad R.; Shachter, Ross D. (1992): Representation of preferences in decision-support systems. In: *Computers and Biomedical Research* 25 (4), S. 324–335. DOI: 10.1016/0010-4809(92)90023-4.

Field, Andy (2015): How to design and report experiments. 2nd revised edition. [Place of publication not identified]: Sage Publications.

Figueira, José; Greco, Salvatore; Ehrgott, Matthias (Hg.) (2005): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. New York, N.Y.: Springer (International Series in Operations Research & Management Science).

Fischer, Gregory W. (1979): Utility Models for Multiple Objective Decisions. Do they accutately represent Human Preferences? In: *Decision Sciences* 10 (3), S. 451–479. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1979.tb00037.x.

Fishburn, Peter C. (1989): Foundations of Decision Analysis. Along the Way. In: *Management Science* 35 (4), S. 387–405. DOI: 10.1287/mnsc.35.4.387.

Flager, F.; Haymaker, J. (2009): A Comparison of Multidisciplinary Design, Analysis and Optimization Processes in the Building Construction and Aerospace (Technischer Report, TR188).

Forgionne, G. A. (2017): An AHP model of DSS effectiveness. In: *European Journal of Information Systems* 8 (2), S. 95–106. DOI: 10.1057/palgrave.ejis.3000322.

Fraker, Shannon E.; Woodall, William H.; Mousavi, Shabnam (2008): Performance Metrics for Surveillance Schemes. In: *Quality Engineering* 20 (4), S. 451–464. DOI: 10.1080/08982110701810444.

Franken, Rolf (1984): Materialwirtschaft. Planung und Steuerung des betrieblichen Materialflusses. Stuttgart, Berlin: W. Kohlhammer (Kohlhammer Studienbücher. Wirtschaftswissenschaften).

Frost, R. B. (1999): Why Does Industry Ignore Design Science? In: *Journal of Engineering Design* 10 (4), S. 301–304. DOI: 10.1080/095448299261218.

Fullalove, Richard (2017): Developing an Operational Concept Framework to support government policy and regulation on Connected and Automated Vehicles. In: *INCOSE International Symposium* 27 (1), S. 357–370. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2017.00365.x.

Funke, Joachim (1992): Wissen über dynamische Systeme: Erwerb, Repräsentation und Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lehr- und Forschungstexte Psychologie).

Gan, Xu-Sheng; Duanmu, Jing-Shun; Wang, Huan-Bin (2015): Delphi Analysis Method and Its Application in Qualitative Prediction of Aircraft Collision Unsafe Event for Air Traffic Control. In: *International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering*.

Geldermann, Jutta (2014): Leitfaden zur Anwendung von Methoden der Multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Methode PROMETHEE. Hg. v. Lehrstuhl für Produktion und Logistik. Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.

Gertler, Jeremiah (2017): Advanced Pilot Training (T-X) Program. R44856.

Gigerenzer, Gerd; Todd, Peter M. (2001): Simple heuristics that make us smart. New York, Oxford: Oxford University Press (Evolution and cognition).

Gkirgkis, Akis; Kassapologou, Christos; Curran, Richard (2017): A Value Operations Methodology (VOM) Approach to Multi-Criteria Assessment of Similar-Class Air Vehicles: An Airbus A350 Versus the Boeing 787 Case Study. In: 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference 2017. Denver, Colorado, 5-9 June 2017. Red Hook, NY: Curran Associates Inc.

Gollnick, Volker (2004): Untersuchung zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel. München (Dissertation).

Gollnick, Volker; Stumpf, Eike; Lehner, Stephan (2011): Virtual Integration Platforms (VIP). A Concept for Integrated and Interdisciplinary Air Transportation Research and Assessment. In: 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, VA. [Reston, VA]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics].

Greco, Salvatore; Ehrgott, Matthias; Figueira, José Rui (Hg.) (2016): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. 2nd ed. New York, NY: Springer New York (International Series in Operations Research & Management Science, 233).

Grieser, Jürgen (1997): Hauptkomponentenanalyse. Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Frankfurt.

Guitouni, Adel; Martel, Jean-Marc (1998): Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. In: *European Journal of Operational Research* 109 (2), S. 501–521. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00073-3.

Häder, Michael; Häder, Sabine (2000): Die Delphi-Methode als Gegenstand methodischer Forschungen. In: Michael Häder und Sabine Häder (Hg.): Die Delphi-Technik in den Sozialwissenschaften. Methodische Forschungen und innovative Anwendungen. Wiesbaden, s.l.: VS Verlag für Sozialwissenschaften (ZUMA-Publikationen), S. 11–31.

Hall, Dianne J. (2008): Decision Makers and Their Need for Support. In: Frada Burstein und Clyde Holsapple (Hg.): Handbook on Decision Support Systems 1. Basic Themes. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (International Handbooks Information System), S. 83–102.

Härdle, Wolfgang; Simar, Léopold (2012): Applied multivariate statistical analysis. 3rd ed. Heidelberg, New York: Springer.

Harris, Don; Li, Wen-Chin (2015): Decision Making in Aviation. Farnham [u.a.]: Ashgate (Critical essays on human factors in aviation).

Harris, Glen; Fricke, Mary (1996): Joint Modeling And Simulation System (J-MASS).

Harth, Michael (2006): Multikriterielle Bewertung als Beitrag zur Entscheidungsfindung in der Landnutzungsplanung. Institut für Agrarökonomie und Agrarraumgestaltung. Halle (Dissertation).

Hellert, Christian; Stütz, Peter (2017): Performance prediction and selection of aerial perception functions during UAV missions. In: 2017 IEEE Aerospace Conference. Yellowstone Conference Center, Big Sky, Montana, March 4-11, 2017. IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–12.

Helton, Jon C. (2011): Quantification of margins and uncertainties. Conceptual and computational basis. In: *Reliability Engineering & System Safety* 96 (9), S. 976–1013. DOI: 10.1016/j.ress.2011.03.017.

Henkel, Ramon E. (2004): Tests of significance. [Nachdr.]. Newbury Park [u.a.]: Sage Publ (Sage University papers / Quantitative applications in the social sciences, 4).

Henning, Hans Jörg; Muthig, Klaus (1979): Grundlagen konstruktiver Versuchsplanung. Ein Lehrbuch für Psychologen. München: Kösel (Kösel-Ausbildung).

Herbst, W. B. (1980): Future Fighter Technologies. In: *Journal of Aircraft* 17 (8), S. 561–566. DOI: 10.2514/3.44674.

Hermanns, Andre (2013): Anwender-Akzeptanz und Bewertung unbemannter Flugsysteme ("Drohnen") im Katastrophenschutz. Theorie, Empirie, regulatorische Implikationen. Berlin, Münster: LIT (Zivile Sicherheit, Bd. 6).

Hershey, John C.; Kunreuther, Howard C.; Schoemaker, Paul J. H. (1982): Sources of Bias in Assessment Procedures for Utility Functions. In: *Management Science* 28 (8), S. 936–954. DOI: 10.1287/mnsc.28.8.936.

Hillestad, Richard; Bennett, Bart; Moore, Louis (1996): Modeling for Campaign Analysis. Lessons for the next Generation of Models. Executive Summary. Hg. v. RAND. United States Air Force. Santa Monica.

Hillestad, Richard; Moore, Louis (1996): The Theater-Level Campaign Model. A Research Prototype for a New Generation of Combat Analysis Model.

Hixson, Jonathan G.; Jacobs, Eddie L.; Vollmerhausen, Richard H. (2004): Target detection cycle criteria when using the targeting task performance metric. In: Ronald G. Driggers und David A. Huckridge (Hg.): European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security. London, United Kingdom, Monday 25 October 2004: SPIE (SPIE Proceedings), S. 275.

Hodgkin, Julie; Belton, Valerie; Koulouri, Anastasia (2005): Supporting the intelligent MCDA user. A case study in multi-person multi-criteria decision support. In: *European Journal of Operational Research* 160 (1), S. 172–189. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.03.007.

Hollenberg, Stefan (2016): Fragebögen. Fundierte Konstruktion, sachgerechte Anwendung und aussagekräftige Auswertung. 1. Aufl. 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Holsapple, Clyde W.; Sena, Mark P. (2005): ERP plans and decision-support benefits. In: *Decision Support Systems* 38 (4), S. 575–590. DOI: 10.1016/j.dss.2003.07.001.

Holst, Gerald C. (2008): Electro-optical imaging system performance. 5th ed. Winter Park, FL, Bellingham, Wash.: JCD Publishing; SPIE.

Huang, Hui-Min; Pavek, Kerry; Albus, James; Messina, Elena (2005a): Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework: an update. In: Grant R. Gerhart, Charles M. Shoemaker und Douglas W. Gage (Hg.): Proc. SPIE 5804, Unmanned Ground Vehicle Technology VII. Defense and Security. Orlando, Florida, USA, Monday 28 March 2005: SPIE (SPIE Proceedings), S. 439.

Huang, Hui-Min; Pavek, Kerry; Novak, Brian; Albus, James; Messina, Elena (2005b): A Framework For Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS). In: Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America. AUVSI's Unmanned Systems North America. Baltimore, MD, 28. - 30. Juni 2005. Association for Unmanned Vehicle Systems International.

Hussy, Walter (2010): Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften - für Bachelor. 1. Aufl. Berlin: Springer.

Hussy, Walter; Jain, Anita (2002): Experimentelle Hypothesenprüfung in der Psychologie. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie.

Hwang, Ching-Lai; Yoon, Kwangsun (1981): Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 186).

Iman, Ronald L. (2008): Latin Hypercube Sampling. In: Edward L. Melnick und Brian S. Everitt (Hg.): Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment. Chichester: Wiley.

Irvine, John M. (1997): National imagery interpretability rating scales (NIIRS). Overview and methodology. In: Wallace G. Fishell (Hg.): Airborne Reconnaissance, XXI. Optical Science, Engineering and Instrumentation '97. San Diego, CA, Sunday 27 July 1997: SPIE (SPIE Proceedings), S. 93–103.

Irvine, John M.; Cannon, David M.; Israel, Steven A.; O'Brien, Gary; Fenimore, Charles; Roberts, John; Aviles, Ana Ivelisse (2007): Quantifying interpretability for motion imagery. Applications to image chain analysis. In: Information Fusion, 2007 10th International Conference on Information Fusion. Quebec City, QC, Canada, 9.-12. July 2007, S. 1–8.

Jackson, Scott (2015): Systems engineering for commercial aircraft. 2. Aufl. Aldershot, England, Brookfield, Vt., USA: Ashgate.

Jacoby, Jacob; Speller, Donald E.; Kohn, Carol A. (1974): Brand Choice Behavior as a Function of Information Load. In: *Journal of Marketing Research* 11 (1), S. 63. DOI: 10.2307/3150994.

Jaiswal, N. K. (1997): Military Operations Research. Quantitative Decision Making. Boston, MA: Springer US (International Series in Operations Research & Management Science, 5).

Johnson, Eric J.; Payne, John W. (1985): Effort and Accuracy in Choice. In: *Management Science* 31 (4), S. 395–414. DOI: 10.1287/mnsc.31.4.395.

Johnson, John (1958): Analysis of Image forming Systems. In: *Image Intensifier Symposium* (AD 220160), S. 244–273.

Joseph Nalepka (2000): JIMM: The next Step for Mission Level Simulation Models. Air Force Research Laboratory. Denver.

Kahneman, Daniel (2001): Judgment and uncertainty. Heuristics and biases. Repr. Cambridge: Cambridge University Press.

Keen, Peter G. W.; Scott Morton, Michael S. (1978): Decision support systems. An organizational perspective. London: Addison-Wesley (Addison-Wesley Series on Decision Support).

Keeney, Ralph L.; Raiffa, Howard (1994): Decisions with Multiple Objectives. Preferences and Value Tradeoffs. New York: J. Wiley.

Khazanchi, D. (1991): Evaluating decision support systems. A dielectrical perspective. In: Proceedings of the Twenty-Fourth Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Twenty-Fourth Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Kauai, HI, USA, 8-11 Jan. 1991: IEEE Comput. Soc. Press, S. 90–97.

Kim, I. Y.; Weck, Oliver L. de (2006): Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization. A new method for Pareto front generation. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 31 (2), S. 105–116. DOI: 10.1007/s00158-005-0557-6.

King, A. M.; Sivaloganathan, S. (1999): Development of a Methodology for Concept Selection in Flexible Design Strategies. In: *Journal of Engineering Design* 10 (4), S. 329–349. DOI: 10.1080/095448299261236.

Kirby, Michelle R. (2001): A Methodlogy for Technology Identification, Evaluation, and Selection in Conceptual and Preliminary Aircraft Design. Georgia Institute of Technology (Dissertation).

Kirby, Michelle R.; Mavris, Dimitri N. (1999): Forecasting Technology Uncertainty in Preliminary Aircraft Design. Georgia Institute of Technology. San Francisco.

Klein, Armin (2004): Wie strukturiert man ein Projekt? In: Armin Klein (Hg.): Projektmanagement für Kulturmanager. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 83–104.

Klein, Gary A. (1998): Sources of Power: How People Make Decisions: MIT Press.

Kline, Stephen (1996): Conceptual foundations for multidisciplinary thinking. [2nd print.]. Stanford: Stanford University Press.

Klußmann, Niels; Malik, Arnim (2007): Lexikon der Luftfahrt. 2., aktual. u. erw. Aufl. Berlin: Springer.

Kluwe, Rainer H. (1995): Single Case Studies and Models of Complex Problem Solving. In: Peter A. Frensch und Joachim Funke (Hg.): Complex problem solving. The European perspective. London: Routledge.

Koch, Uwe (1996): Bewertung und Wirtschaftlichkeitsermittlung logistischer Systeme. Zur Bedeutung von Informationen in der Logistik. Wiesbaden, Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; Gabler (Gabler Edition Wissenschaft).

Kofalk, S.; Kühlborn, J. (2001): Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines Decision Support Systems (DSS). Towards a Generic Tool for River Basin Management - feasibility study. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Berlin (8).

Koornneef, Hemmo; Verhagen, Wim J.C.; Curran, Richard (2017): A Multi-Criteria Decision Making Framework for Aircraft Dispatch Assessment. In: Chun-Hsien Chen, Amy Trappey, Margherita Peruzzini, Josip Stjepandić und Nel Wognum (Hg.): Transdisciplinary Engineering. A Paradigm Shift: Proceedings of the 24th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, July 10-14, 2017. Amsterdam: IOS Press (Advances in transdisciplinary engineering, volume 5), S. 11–20.

Korhonen, Pekka (2005): Interactive Methods. In: José Figueira, Salvatore Greco und Matthias Ehrgott (Hg.): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys, Bd. 78. New York, N.Y.: Springer (International Series in Operations Research & Management Science), S. 641–661.

Kouhestani, C.; Woo, B.; Birch, G. (2017): Counter unmanned aerial system testing and evaluation methodology. In: Edward M. Carapezza (Hg.): Proceedings Volume 10184, Sensors, and Command, Control,

Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security, Defense, and Law Enforcement Applications XVI. SPIE Defense + Security. Anaheim, California, United States, Sunday 9 April 2017: SPIE (SPIE Proceedings).

Kromrey, Helmut (2001): Evaluation - ein vielschichtiges Konzept. Begriff und Methodik von Evaluierung und Evaluationsforschung ; Empfehlungen für die Praxis. In: *Sozialwissenschaften und Berufspraxis*, S. 105–131.

Kulhavy, Ernest (1963): Operations Research. Die Stellung der Operationsforschung in der Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag; Imprint.

Kurbel, Karl (1989): Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kurz, Hannah (2016): Entwicklung eines Werkzeuges zur Kostenschätzung am Beispiel des Airbus A320. betreut durch Sten Morawietz, Dr. Michael Strohal. Masterarbeit. Universität der Bundeswehr München, München. Institut für Flugsysteme.

La Rocca, Gianfranco; van L. Tooren, Michel J. (2009): Knowledge-Based Engineering Approach to Support Aircraft Multidisciplinary Design and Optimization. In: *Journal of Aircraft* 46 (6), S. 1875–1885. DOI: 10.2514/1.39028.

Langhans, Stephan; Gollnick, Volker; Stumpf, Eike (2008): A Holistic Approach to Evaluate the Air Transportation System. In: 26th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences. Including the 8th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference : 14-19 september 2008, Anchorage, Alaska, USA. Edinburgh: Optimage Ltd.

Langhans, Stephan; Linke, Florian; Nolte, Peter; Schnieder, Hans (2010): System Analysis for Future Long-Range Operation Concepts. In: 27th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences. 27th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences. Nizza, France, 19.-24. Sept. 2010.

Laux, Helmut; Gillenkirch, Robert M.; Schenk-Mathes, Heike Yasmin (2014): Entscheidungstheorie. 9., vollst. überarb. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler (Springer-Lehrbuch).

Li, Ni; Tan, Runxiang; Huang, Zhanpeng; Tian, Chao; Gong, Guanghong (2016): Agile Decision Support System for Aircraft Design. In: *J. Aerosp. Eng.* 29 (2), S. 4015044. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000514.

Li, Yongchang; Hollingsworth, Peter; Mavris, Dimitri N. (2005): A Concept Selection Method developed from a Probabilistic Multi-Criteria Decision Making Technique Using Utility Theory. In: SAE 2005 Transactions Journal of Aerospace - V114-1. Aerospace Technology Conference and Exposition, OCT. 03, 2005: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series).

Liefer, Randal K.; Valasek, John; Eggold, David P. (1990): Fighter Agility Metrics, Research and Test. Phase 1 Report. KU-FRL-831-2. University of Kansas Center for Research. Lawrence.

Macchiarilo, Charles Richard (1973): A review of literature on the theory of visual target detection probabilities. Naval Postgraduate School. Monterey.

MacGregor, Donald; Lichtenstein, Sarah; Slovic, Paul (1988): Structuring knowledge retrieval. An analysis of decomposed quantitative judgments. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 42 (3), S. 303–323. DOI: 10.1016/0749-5978(88)90003-9.

Malczewski, Jacek (1999): GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York, Toronto: J. Wiley.

Marques, Mário Monteiro (2012): Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability. 3. Aufl. (STANAG 4586).

Marsh, Kevin; IJzerman, Maarten; Thokala, Praveen; Baltussen, Rob; Boysen, Meindert; Kaló, Zoltán et al. (2016): Multiple Criteria Decision Analysis for Health Care Decision Making--Emerging Good Practices. Report 2 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. In: *Value in health : the journal of the International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research* 19 (2), S. 125–137. DOI: 10.1016/j.jval.2015.12.016.

Mason, Richard O.; Mitroff, Ian I. (1973): A Program for Research on Management Information Systems. In: *Management Science* 19 (5), S. 475–487. DOI: 10.1287/mnsc.19.5.475.

Mattson, Christopher A.; Messac, Achille (2003): Concept Selection Using s-Pareto Frontiers. In: *AIAA Journal* 41 (6), S. 1190–1198. DOI: 10.2514/2.2063.

Mavris, Dimitri N.; Baker, Andrew P.; Schrage, Daniel P. (2011): Implementation of a Technology Impact Forecast Technique on a Civil Tiltrotor. In: American Helicopter Society 55th Annual Forum. American Helicopter Society 55th Annual Forum. Montreal, Quebec, Canada, 25. - 27. May 1999. Red Hook, NY, S. 475–488.

Mavris, Dimitri N.; Bandte, Oliver; Schrage, Daniel P. (1996): Application of Probabilistic Methods for the Determination of an economically robust HSCT configuration.

Mavris, Dimitri N.; DeLaurentis, Daniel A. (1997): A Stochastic Design Approach for Aircraft Affordability. In: 36th AIAA Aerospace Science Meeting & Exhibit. 36th AIAA Aerospace Science Meeting & Exhibit. Reno, NV, 12. - 15. January: [American Institute of Aeronautics and Astronautics].

Mavris, Dimitri N.; DeLaurentis, Daniel A. (2000): A probabilistic approach for examining aircraft concept feasibility and viability. In: *Aircraft Design* 3 (2), S. 79–101. DOI: 10.1016/S1369-8869(00)00008-2.

Mavris, Dimitri N.; Griendling, Kelly; Dickerson, Charles E. (2013): Relational-Oriented Systems Engineering and Technology Tradeoff Analysis Framework. In: *Journal of Aircraft* 50 (5), S. 1564–1575. DOI: 10.2514/1.C032079.

Mavris, Dimitri N.; Kirby, Michelle R. (1999): Technology Identification, Evaluation and Selection for Commercial Transport Aircraft. Georgia Institute of Technology. San Jose (Annual Conference, 58).

Mavris, Dimitri N.; Kirby, Michelle R.; Qiu, Songtao (1998): Technology Impact Forecasting for a High Speed Civil Transport. In: SAE Technical Paper. World Aviation Congress & Exposition, SEP. 28, 1998:

SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series).

Mavris, Dimitri N.; Pinon, Olivia J. (2010): A Systems Engineering Approach to Aircraft Design. In: Richard Blockley und Wei Shyy (Hg.): Encyclopedia of aerospace engineering. Hoboken, NJ: Wiley Interscience.

Mavris, Dimitri N.; Roth, Bryce (1997): A Methodology for Robust Design of Impingement-cooled HSCT Combustion Liners. In: 36th AIAA Aerospace Science Meeting & Exhibit. 36th AIAA Aerospace Science Meeting & Exhibit. Reno, NV, 12. - 15. January: [American Institute of Aeronautics and Astronautics].

Mavris, Dimitri N.; Soban, Danielle S.; Largent, Matthew C. (1999): An Application of a Technology Impact Forecasting (TIF) Method to an Uninhabited Combat Aerial Vehicle. Warrendale, PA: SAE International.

Maynard, Sean; Burstein, Frada; Arnott, Dzvid (2001): A Multi-faceted Decision Support System Evaluation Approach. In: *Journal of Decision System* 10 (3-4), S. 395–428. DOI: 10.3166/jds.10.395-428.

McDonnell Douglas Astronautics Company (1999): The USAF Stability and Control DATCOM. Volume I: Users Manual. Version 2.

Mehlhorn, Kurt; Sanders, Peter (2008): Algorithms and data structures. The basic toolbox. Berlin: Springer.

Meller, Frank; Jost, Peter (1998): Key Buying Factors and Added Value. A New Approach to Aircraft Evaluation. In: DGLR-Workshop: Bewertung von Flugzeugen. DOC, LCC, Kommunalität, Reichweitenflexibilität etc. Wie lautet die neue Formel der Flugzeugbewertung? DGLR: Bewertung von Flugzeugen. Garching, 26.10.1998. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.

Mellers, B. A.; Schwartz, A.; Cooke, A. D. (1998): Judgment and Decision Making. In: *Annual review of psychology* 49, S. 447–477. DOI: 10.1146/annurev.psych.49.1.447.

Melles, Torsten (2001): Framing-Effekte in der Conjoint-Analyse. Ein Beispiel für Probleme der Merkmalsdefinition. Zugl.: Münster (Westfalen), Univ., Diss, 2001. Aachen: Shaker (Berichte aus der Psychologie).

Mello, Joan Carlos de; Fernandes, Joan Erick; Gomes, Luiz Flavio (2012): Multicriteria Selection of an Aircraft with Naide. In: Carlos Luz (Hg.): ICORES 2012 - 1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems. Vilamoura, Algarve, Portugal, 4.-6. Februar 2012.

Mendoza, G. A.; Martins, H. (2006): Multi-criteria decision analysis in natural resource management. A critical review of methods and new modelling paradigms. In: *Forest Ecology and Management* 230 (1-3), S. 1–22. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.03.023.

Mertens, Peter (1987): Expertensysteme auf dem Weg in die Praxis — Versuch einer Bestandsaufnahme im deutschsprachigen Raum. In: H. Isermann (Hg.): Operations research proceedings 1986. Papers of the 15th annual meeting = Vorträge der 15. Jahrestagung. Berlin, New York: Springer-Verlag, S. 102.

Messac, A.; Ismail-Yahaya, A.; Mattson, C. A. (2003): The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 25 (2), S. 86–98. DOI: 10.1007/s00158-002-0276-1.

Messac, Achille (2015): Optimization in practice with MATLAB for engineering students and professionals. New York, NY: Cambridge University Press.

Milan, Janic (2010): Multicriteria Evaluation of High-speed Rail, Transrapid Maglev and Air Passenger Transport in Europe. In: *Transportation Planning and Technology* 26 (6), S. 491–512. DOI: 10.1080/0308106032000167373.

Milan, Janić (1993): A model of competition between high speed rail and air transport. In: *Transportation Planning and Technology* 17 (1), S. 1–23. DOI: 10.1080/03081069308717496.

Morawietz, Sten; Strohal, Michael; Stütz, Peter (2015): Holistic Metrics for the Evaluation of Aerial Platforms. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2015*.

Morawietz, Sten; Strohal, Michael; Stütz, Peter (2016): Consideration of Sensor Surveillance Capabilities within the Holistic Evaluation of Aerial Platforms. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016*.

Morawietz, Sten; Strohal, Michael; Stütz, Peter (2017): A Mission-Based Approach for the Holistic Evaluation of Aerial Platforms. Implementation and Proof of Concept. In: 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Denver, Colorado. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Morawietz, Sten; Strohal, Michael; Stütz, Peter (2018): A Decision Support System for the Mission-based Evaluation of Aerial Platforms. Advancements and final Validation Results. In: 19th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Atlanta, Georgia. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Müller-Herbers, Sabine (2007): Methoden zur Beurteilung von Varianten. 4. Aufl. Fakultät Architektur und Stadtplanung, Institut für Grundlagen der Planung.

Nichols, Sharon (2005): Air Force Standard Analysis Toolkit and Analysis Approach. Hg. v. AFSAA/SAAT,1777 N Kent St ,Rosslyn,VA, 22209. Air Force Studies and Analysis Agency Washington DC (Modeling and Simulation Conference, 2005 Dec 12-15, Las Cruces, NM).

Niegemann, Helmut M. (2008): Kompendium multimediales Lernen. Berlin, [New York]: Springer (X.media.press).

Nitzsch, Rüdiger von (1992): Entscheidung bei Zielkonflikten. Ein PC-gestütztes Verfahren. Wiesbaden: Gabler (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 95).

Nitzsch, Rüdiger von (2011): Entscheidungslehre. Wie Menschen entscheiden und wie sie entscheiden sollten. 6. Aufl. Aachen: Wissenschatsverlag Mainz.

Oberkampf, William L. (2013): Verification and validation in scientific computing. Unter Mitarbeit von Christopher J. Roy. Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press.

Oberschmidt, Julia (2009): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Energietechnologien unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Präferenzen. In: *Internationalen Energiewirtschaftstagung an der TU Wien IEWT 2009.*

Oberschmidt, Julia (2010): Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Göttingen. Göttingen (Dissertation).

Oberschmidt, Julia; Geldermann, Jutta; Ludwig, Jens (2009): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Energietechnolgien unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Präferenzen. In: *Energie, Wirtschaft und technologischer Fortschritt in Zeiten hoher Energiepreise.*

Oettinger, Michael (2017): Data Science. Eine praxisorientierte Einführung im Umfeld von Machine Learning, künstlicher Intelligenz und Big Data. Hamburg: tredition.

Olson, David L. (2008): Multi-Criteria Decision Support. In: Frada Burstein und Clyde Holsapple (Hg.): Handbook on Decision Support Systems 1. Basic Themes. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (International Handbooks Information System), S. 299–314.

Onken, Reiner; Schulte, Axel (2012): System-ergonomic design of cognitive automation. Dual-mode cognitive design of vehicle guidance: Springer.

Osgood, Charles Egerton (1975): The measurement of meaning. 9th printing. Urbana, Ill. etc: University of Illinois Press.

Otto, Kevin N. (1995): Measurement methods for product evaluation. In: *Research in Engineering Design* 7 (2), S. 86–101. DOI: 10.1007/BF01606904.

Papula, Lothar (2009): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium. 12., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (Viewegs Fachbücher der Technik).

Park, T. (1998): Determination of an Optimal Set of Design Requirements using House of Quality. In: *Journal of Operations Management* 16 (5), S. 569–581. DOI: 10.1016/S0272-6963(97)00029-6.

Patton, Carl V.; Sawicki, David S.; Clark, Jennifer J. (2016): Basic methods of policy analysis and planning. Third edition. London: Routledge.

Payne, John W. (1993): The adaptive decision maker. Cambridge: Cambridge University Press.

Peters, Malte L.; Zelewski, Stephan (2007): TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. In: *WIST* 36 (1), S. 9–15. DOI: 10.15358/0340-1650-2007-1-9.

Pfister, Hans-Rüdiger; Jungermann, Helmut; Fischer, Katrin (2017): Die Psychologie der Entscheidung. Eine Einführung. 4. Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer.

Pfohl, Hans Christian (1976): Praktische Relevanz von Entscheidungstechniken. In: *Die Unternehmung* 30 (2).

Pitz, G. F.; Sachs, N. J. (1984): Judgment and Decision: Theory and Application. In: *Annual review of psychology* 35, S. 139–163. DOI: 10.1146/annurev.ps.35.020184.001035.

Podvezko, Valentinas; Podviezko, Askoldas (2010): Dependence of multi-criteria evaluation result on choice of preference functions and their parameters. In: *Technological and Economic Development of Economy* 16 (1), S. 143–158. DOI: 10.3846/tede.2010.09.

Poe, Arthur C. (1974): A Model for Visual Detection of Aircraft by Ground Observers. Army Missile Research, Development and Engineering Laboratory. Redstone Arsenal, Alabama.

Polatidis, Heracles; Haralambopoulos, Dias A.; Munda, Giussepe; Vreeker, Ron (2006): Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning. In: *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 1 (2), S. 181–193. DOI: 10.1080/009083190881607.

Powalla, Christian (2009): Heuristiken im Rahmen der strategischen Analyse. Ein Vergleich der Prognose kraft von VRIO-Framework und Rekognitionsheuristik. Fachbereich Wirtschaftswissenschaft der Freien Universität Berlin (Dissertation).

Pöyhönen, Mari; Hämäläinen, Raimo P. (2001): On the convergence of multiattribute weighting methods. In: *European Journal of Operational Research* 129 (3), S. 569–585. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00467-1.

Pozzetti, André Dean (2015): A decision-support tool for military aerospace performance-based contracting (Dissertation).

Pozzetti, André Dean; Bil, Ces; Clark, Graham (2010): Implementation of Performance-based System Assessment of Military Multi-Mission Platforms. In: 27th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences. 27th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences. Nizza, France, 19.-24. Sept. 2010.

Pozzetti, André Dean; Bilegan, Ioana; Duvivier, David; Forato, Sébastien; Matrat, Barbara (2014): Decision Support System for Offers of Fleet Availability Services. In: *The 9th International Conference on Systems (ICONS 2014)*, 23.02.2014, S. 150–153.

Quadt, Maximilian (2018): Multikriterielle Methoden als Beitrag zur missionsorientierten Bewertung luftgestützter Systeme. betreut durch Sten Morawietz. Bachelorarbeit. Universität der Bundeswehr München, Institut für Flugsysteme, München.

Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer (VDI-Buch).

Rapoport, Anatol (1985): Allgemeine Systemtheorie. Wesentl. Begriffe u. Anwendungen: Verl. Darmstädter Blätter (Reihe Wissenschaft und Philosophie, 11).

Rausch, Andreas; Broy, Manfred (2006): Das V-Modell XT. Grundlagen, Erfahrungen und Werkzeuge. 1. Aufl. Heidelberg, Neckar: Dpunkt.

Raymer, Daniel P. (1989): Aircraft design. A conceptual approach. 5th ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA education series).

Raymer, Daniel P. (2002): Enhancing aircraft conceptual design using multidisciplinary optimization. Stockholm: Tekniska högsk (Report / Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics, 2002:2).

Recke, Guido (2005): Entscheidungsanalyse unter Risiko und Unsicherheit. Entscheidungscharakteristika in ökonomischen Netzen. 1. Aufl. Göttingen: Duehrkohp und Radicke (Wirtschaftswissenschaften, Bd. 4).

Reeg, Matthias (2009): Auswahl einer MCDA-Methode unter Nachhaltigkeitsbedingungen für ein Bioenergiekonzept in Ludwigsfelde. Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien (Diplomarbeit).

Rehkugler, Heinz; Schindel, Volker (1990): Entscheidungstheorie. Erklärung und Gestaltung betrieblicher Entscheidungen. 5. Aufl. München: VVF (Fachbuchreihe für Studium, Fortbildung, Praxis, 53).

ReVelle, Jack B.; Moran, John W.; Cox, Charles A. (1998): The QFD handbook. New York: Wiley.

Rhee, Cheul; Rao, H. Raghav (2008): Evaluation of Decision Support Systems. In: Frada Burstein und Clyde Holsapple (Hg.): Handbook on Decision Support Systems 2. Variations. New York: Springer (International Handbooks on Information Systems Ser), S. 313–327.

Riehl, Jr.Kenneth (1996): Historical review of reconnaissance image evaluation techniques. In: Wallace G. Fishell, Arthur A. Andraitis, Jr.Alfred C. Crane und Michael S. Fagan (Hg.): Airborne Reconnaissance. SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. Denver, CO, Sunday 4 August 1996: SPIE (SPIE Proceedings), S. 322–334.

Ringuest, Jeffrey L. (1992): Compromise Programming. In: Jeffrey L. Ringuest (Hg.): Multiobjective Optimization: Behavioral and Computational Considerations. Boston, MA: Springer US, S. 51–59.

Rivett, Patrick (1977): Multidimension scaling for multiobjective policies. In: *Omega* 5 (4), S. 367–379. DOI: 10.1016/0305-0483(77)90002-0.

Rodríguez-Padial, N.; Marín, M.; Domingo, R. (2015): Strategic Framework to Maintenance Decision Support Systems. In: *Procedia Engineering* 132, S. 903–910. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.576.

Roesler, S.; Heinrich, W.; Schraube, H. (2002): Monte Carlo Calculation of the Radiation Field a Aircraft Altitudes. In: *Radiation Protection Dosimetry* 98 (4), S. 367–388. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006728.

Rohr, Torsten (2004): Einsatz eines mehrkriteriellen Entscheidungsverfahrens im Naturschutzmanagement. Dargestellt am Naturschutzprojekt "Weidelandschaft Eidertal". Agrarwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrechts-Universität. Kiel (Dissertation).

Rosenberger, Matthias; Freitag, Matthias (2009): Repertory Grid. In: Stefan Kühl (Hg.): Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und qualitative Methoden. 1. Aufl. Wiesbaden: Verl. für Sozialwiss. / GWV Fachverl., S. 477–496.

Roshanian, Jafar; Ebrahimi, Masoud (2013): Latin hypercube sampling applied to reliability-based multidisciplinary design optimization of a launch vehicle. In: *Aerospace Science and Technology* 28 (1), S. 297–304. DOI: 10.1016/j.ast.2012.11.010.

Rossow, Cord-Christian; Wolf, Klaus; Horst, Peter (2014): Handbuch der Luftfahrzeugtechnik. Mit 1130 Bildern und 34 Tabellen. München: Hanser.

Roszkowska, Ewa (2013): Rank Ordering Criteria Weighting Methods – a Comparative Overview. In: *Optimum* (5(65)), S. 14–33. DOI: 10.15290/ose.2013.05.65.02.

Rousis, Damon (2011): A Pareto Frontier Intersection-based Approach for Efficient Multiobjective Optimization of Competing Concept Alternatives (Dissertation), zuletzt geprüft am 10.11.2016.

Roy, Bernard (1996): Multicriteria methodology for decision aiding. Dordrecht, Netherlands, Boston, Mass.: Kluwer Academic Publishers (Nonconvex optimization and its applications, volume 12).

Ruhland, Alexander (2004): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Verfahren der Trinkwasseraufbereitung an den Beispielen Arsenentfernung und zentrale Enthärtung. Berlin (Dissertation).

Ryan, George W.; Downing, David R. (1995): Evaluation of several agility metrics for fighter aircraft using optimal trajectory analysis. In: *Journal of Aircraft* 32 (4), S. 732–738. DOI: 10.2514/3.46784.

Saaty, Thomas L. (2008): Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. In: *IJSSCI* 1 (1), S. 83. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

Sadraey, Mohammad H. (2013): Aircraft Design. A Systems Engineering Approach. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley (Aerospace series).

Sage, Andrew P. (1991): Decision support systems engineering. New York: Wiley (Wiley series in systems engineering).

Salas, Eduardo; Wilson, Katherine A.; Edens, Eleana (2016): Crew resource management. Critical essays. Abingdon, Oxon: Routledge (Critical essays on human factors in aviation).

Sánchez-Lozano, J. M.; Serna, J.; Dolón-Payán, A. (2015): Evaluating military training aircrafts through the combination of multi-criteria decision making processes with fuzzy logic. A case study in the Spanish Air Force Academy. In: *Aerospace Science and Technology* 42, S. 58–65. DOI: 10.1016/j.ast.2014.12.028.

Scanlan, James; Rao, Abhijit; Bru, Christophe; Hale, Peter; Marsh, Rob (2006): DATUM Project. Cost Estimating Environment for Support of Aerospace Design Decision Making. In: *Journal of Aircraft* 43 (4), S. 1022–1028. DOI: 10.2514/1.17362.

Scheiderer, Joachim (2008): Angewandte Flugleistung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schneider, Elke (1994): Der Prozeß der Wissensakquisition und seine Integration in den Expertensystem-Entwicklungsprozeß. Bergisch Gladbach, Köln: Verlag Josef Eul (Reihe Wirtschaftsinformatik, Bd. 12).

Schnell, Rainer; Hill, Paul B.; Esser Elke (2014): Methoden der empirischen Sozialforschung. 10 Aufl. [s.l.]: De Gruyter Oldenbourg.

Schoemaker, Paul J. H.; Waid, C. Carter (1982): An Experimental Comparison of Different Approaches to Determining Weights in Additive Utility Models. In: *Management Science* 28 (2), S. 182–196. DOI: 10.1287/mnsc.28.2.182.

Scholz, Dieter (1998): DOCSYS - A Method to Evaluate Aircraft Systems. In: DGLR-Workshop: Bewertung von Flugzeugen. DOC, LCC, Kommunalität, Reichweitenflexibilität etc. Wie lautet die neue Formel der Flugzeugbewertung? DGLR: Bewertung von Flugzeugen. Garching, 26.10.1998. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.

Schopphoven, Iris (1996): Messung von Entscheidungsqualität. Konzeptualisierung, Operationalisierung und Validierung eines Meßinstrumentariums für Entscheidungsqualität. Frankfurt am Main [u.a.]: Lang (Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, 1823).

Schulte, Axel (2013): Kognitive und kooperative Automation zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge. Unter Mitarbeit von DuEPublico: Duisburg-Essen Publications Online, University of Duisburg-Essen, Germany.

Schwartz, Barry (2009): The paradox of choice. Why more is less. 19. printing. New York, N.Y.: HarperCollins.

Schweikl, Herbert (1985): Computergestützte Präferenzanalyse mit individuell wichtigen Produktmerkmalen. Berlin: Duncker & Humblot (Schriften zum Marketing, 17).

Schwenkert, Rainer; Stry, Yvonne (2015): Operations Research kompakt. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Sedlmeier, Peter; Renkewitz, Frank (2013): Forschungsmethoden und Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Hallbergmoos, München [etc.]: Pearson Deutschland (PS Pearson Studium. Psychologie, 4131).

Seeger, Hartmut (2005): Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme. [New York]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Shah, Nita H.; Gor, Ravi M.; Soni, Hardik (2010): Operations research. Eastern economy ed. New Delhi, India: PHI Learning.

Shields, Michael D. (1983): Effects of Information Supply and Demand on Judgment Accuracy. Evidence from Corporate Managers. In: *The Accounting Review* 58 (2), S. 284–303.

Shilin, Wang; Jianli, Song; Xiongkui, He; Le, Song; Xiaonan, Wang; Changling, Wang (2017): Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China. In: *Int J Agric & Biol Eng* 2017, 22.07.2017 (Vol. 10 No. 4).

Simon, Herbert A. (1955): A Behavioral Model of Rational Choice. In: *The Quarterly Journal of Economics* 69 (1), S. 99. DOI: 10.2307/1884852.

Smirnov, Denis; Stütz, Peter (2016): Ontology-based modelling of sensor and data processing ressources using OWL. A Proof of Concept. In: European Conference on Visual Perception.

Soban, Danielle S. (2001): A Methodology for the Probabilistic Assessment of System Effectiveness as applied to Aircraft Survivability and Susceptibility. Georgia Institute of Technology (Dissertation).

Soban, Danielle S.; Mavris, Dimitri N. (2001): The Need for a Military System Effectiveness Framework: The System of Systems Approach. In: *AIAA Journal* (2001-5226).

Sprague, Ralph H. (1980): A Framework for the Development of Decision Support Systems. In: *MIS Quarterly* 4 (4), S. 1. DOI: 10.2307/248957.

Sterman, John D. (1989): Modeling Managerial Behavior. Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. In: *Management Science* 35 (3), S. 321–339. DOI: 10.1287/mnsc.35.3.321.

Stewart, T. J. (1981): A Descriptive Approach to Multiple-Criteria Decision Making. In: *The Journal of the Operational Research Society* 32 (1), S. 45. DOI: 10.2307/2581468.

Strassert, Günter (1981): Bewertungshokuspokus durch Nutzwertanalyse. In: Institut für Regionalwissenschaften der Universität Karlsruhe (Hg.): Kritik der Nutzwertanalyse. drei Beiträge. Karlsruhe (Diskussionspapier), S. 19–37.

Strassert, Günter (1995): Das Abwägungsproblem bei multikriteriellen Entscheidungen. Grundlagen und Lösungsansatz, unter besonderer Berücksichtigung der Regionalplanung. Frankfurt am Main, New York: P. Lang.

Strohal, Michael; Stütz, Peter (2018): Missionssensorik - RADAR. Vorlesungsunterlagen Flugsystemtechnik II. Universität der Bundeswehr München. München.

Stuart, Alan (1956): Rank Correlation Methods. By M. G. Kendall, 2nd edition. In: *British Journal of Statistical Psychology* 9 (1), S. 68. DOI: 10.1111/j.2044-8317.1956.tb00172.x.

Stumpf, Eike; Langhans, Stephan; Weiss, Marco; Sun, Xiaoqian; Gollnick, Volker (2011): A Methodology for Holistic Air Transport System Analysis. In: 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, VA. [Reston, VA]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics].

Stütz, Peter (2012): Flugzeugentwurf. Vorlesungsunterlagen Institut für Flugsysteme, Professur für Luftfahrttechnik. Universität der Bundeswehr München.

Stütz, Peter (2016): Future Directions - Sensor and Perception Management. In: System Design Considerations and Technologies for Safe High Tempo Operations in Degraded Environments.

Sumwalt, Robert L.; Lemos, Katherine A. (2010): The Accident Investigator's Perspective. In: Jose M. Anca, Robert L. Helmreich und Barbara G. Kanki (Hg.): Crew resource management. First ed. published as: Cockpit resource management. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press/Elsevier, S. 399–423.

Sun, Xiaoqian (2012): Multiple Criteria Decision Analysis Techniques in Aircraft Design and Evaluation Processes.

Sun, Xiaoqian (2014): Incorporating Multicriteria Decision Analysis Techniques in Aircraft Conceptual Design Process. In: *Journal of Aircraft* 51 (3), S. 861–869. DOI: 10.2514/1.C032530.

Sun, Xiaoqian; Gollnick, Volker; Li, Yongchang; Stumpf, Eike (2014): Intelligent Multicriteria Decision Support System for Systems Design. In: *Journal of Aircraft* 51 (1), S. 216–225. DOI: 10.2514/1.C032296.

Sun, Xiaoqian; Gollnick, Volker; Stumpf, Eike (2011): Robustness Consideration in Multi-Criteria Decision Making to an Aircraft Selection Problem. In: *J. Multi-Crit. Decis. Anal.* 18 (1-2), S. 55–64. DOI: 10.1002/mcda.471.

Sun, Xiaoqian; Li, Yongchang (2010): Evaluation of control system performance using Multiple Criteria Decision Making techniques. In: 2010 49th IEEE Conference on Decision and Control. 2010 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Atlanta, GA, USA. Ieee. Piscataway: IEEE, S. 3718–3723.

Sun, Xiaoqian; Pengfei, Meng; Böhnke, Daniel; Stumpf, Eike (2012): Multi-Criteria Decision Analysis Techniques in Aircraft Conceptual Design Processes. In: 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, No. 3. Edinburgh: Optimage Ltd. on behalf of the International Council of the Aeronautical Sciences, S. 861–869.

Tamrat, B. F. (1988): Fighter Aircraft Agility Assessment Concepts and their Implication on Future Agile Fighter Design. In: AlAA Aircraft Design, Systems and Operations Conference. Aircraft Design, Systems and Operations Conference. Atlanta,GA,U.S.A, 7. - 9. September 1988. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Tan, Felix B.; Hunter, M. Gordon (2002): The Repertory Grid Technique. A Method for the Study of Cognition in Information Systems. In: *MIS Quarterly* 26 (1), S. 39. DOI: 10.2307/4132340.

Teschl, G. (2007): Grundlagen der Graphentheorie. In: Mathematik für Informatiker. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (eXamen.press), S. 409–434.

Thacker, B. H.; Doebling, S. W.; Hemez, F. M.; Anderson, M. C.; Pepin, J. E.; Rodriguez, E. A. (2004): Concepts of Model Verification and Validation.

Tillman, F. A.; Hwang, C. L.; Kuo, Way (1980): System Effectiveness Models: An Annotated Bibliography. In: *IEEE Trans. Rel.* R-29 (4), S. 295–304. DOI: 10.1109/TR.1980.5220844.

Trentini, Michael; Dietrich, Jörg (2016): Unmanned Systems (UMS) Platform Technologies and Performances for Autonomous Operations. TR-AVT-175. NATO Research and Technology Organisation.

Turban, Efraim (1990): Decision support and expert systems. Management support systems. 2nd ed. New York, NY: Macmillan (Macmillan series in information systems).

Tversky, A. (1978): On the Elicitation of Preferences. Descriptive and Prescriptive Considerations. In: David E. Bell, Ralph L. Keeney und Howard Raiffa (Hg.): Conflicting objectives in decisions. Repr. Chichester [etc.]: Wiley (International series on applied systems analysis, 1), S. 209–222.

Vollmerhausen, Richard H. (2004): The Targeting Task Performance (TTP) Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. Technical Report AMSEL-NV-TR-230. Hg. v. Modeling and Simulation Division. Night Vision and Electronic Sensors Directorate, U.S. Army CERDEC.

Wang, Jianrong; Fan, Kai; Su, Yingying; Liang, Shuang; Wang, Wanshan (2008): Air combat effectiveness assessment of military aircraft using a fuzzy AHP and TOPSIS methodology. In: 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing, 2008, ICSC 2008/Asia Simulation Conference. Beijing, China, 10.-12. Oktober 2008. Piscataway, NJ: IEEE, S. 655–662.

Wang, Tien-Chin; Chang, Tsung-Han (2007): Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. In: *Expert Systems with Applications* 33 (4), S. 870–880. DOI: 10.1016/j.eswa.2006.07.003.

Wanke, Peter F.; Zinn, Walter (2004): Strategic Logistics Decision Making. In: *Int Jnl Phys Dist & Log Manage* 34 (6), S. 466–478. DOI: 10.1108/09600030410548532.

Weber, Karl (1993): Mehrkriterielle Entscheidungen: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Weber, Martin; Borcherding, Katrin (1993): Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. In: *European Journal of Operational Research* 67 (1), S. 1–12. DOI: 10.1016/0377-2217(93)90318-H.

Weck, Oliver L. de; Roos, Daniel; Magee, Christopher L. (2012): Engineering systems. Meeting human needs in a complex technological world. Cambridge, Mass.: MIT Press (Engineering systems).

Weckman, Gary R.; Marvel, Jon H.; Shell, Richard L. (2006): Decision Support Approach to Fleet Maintenance Requirements in the Aviation Industry. In: *Journal of Aircraft* 43 (5), S. 1352–1360. DOI: 10.2514/1.19749.

Weiss, Marco; Dzikus, Niclas; Gmelin, Tillmann (2011): Enhanced Assessment of the Air Transportation System. In: 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, VA. [Reston, VA]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics].

Werani, Thomas (2004): Bewertung von Kundenbindungsstrategien in B-to-B-Märkten. Methodik und praktische Anwendung. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 324).

Werner, Lutz (1992): Entscheidungsunterstützungssysteme. Ein problem- und benutzerorientiertes Management-Instrument. Heidelberg: Physica-Verlag HD (Schriftenreihe Handeln und Entscheiden in komplexen ökonomischen Situationen, 5).

White, Carroll T.; Ford, Adelbert (1960): Eye Movements During Simulated Radar Search. In: *J. Opt. Soc. Am.* 50 (9), S. 909. DOI: 10.1364/JOSA.50.000909.

Whitford, Ray (1989): Design for air combat. Alexandria: Jane's.

Wilkens, Ines (2012): Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen – Von der Theorie zur praktischen Anwendung. Hg. v. TU Berlin. Fakultät III - Prozesswissenschaften. Berlin (Dissertation).

Winterfeldt, Detlof von; Edwards, Ward (1993): Decision Analysis and Behavioral Research. Reprint. Cambridge: Cambridge University Press.

Wright, George; Ng, Kee-On (2012): Three Methods for Aiding Clinical Decision Making. In: Chris J. Main (Hg.): Clinical Psychology and Medicine. A Behavioral Perspective. Boston, MA: Springer Verlag, S. 53–67.

Yongchang Li (2007): An Intelligent Knowledge-based Multiple Criteria Decision Making Advisor for Systems Design. Hg. v. School of Aerospace Engineering, Georgia Institute. Aerospace Systems Design Laboratory, School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology.

Yongchang Li; Mavris, Dimitri N.; DeLaurentis, Daniel A. (2004): The Investigation of a Decision-Making Technique Using the Loss Function The Investigation of a Decision-Making Technique Using the

Loss Function The Investigation of a Decision Making Technique Using the Loss Function. In: AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum. Chicago, Illinois. [Reston, VA]: [American Institute of Aeronautics and Astronautics].

Zangemeister, Christof (2014): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 5. Auflage, erweitert. Winnemark, Germany: Prof. Dr.-Ing. Christof Zangemeister.

Zardari, Noorul Hassan; Ahmed, Kamal; Shirazi, Sharif Moniruzzaman; Yusop, Zulkifli Bin (2015): Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management. Cham: Springer International Publishing.

Zhang, Peng; Zhao, Shi-Wei; Tan, Bin; Yu, Li-Ming; Hu, Ke-Qiang (2011): Applications of Decision Support System in Aviation Maintenance. In: Vlad Nicolicin-Georgescu, Henri Briand, Rémi Lehn und Vincent Bénatier (Hg.): Business Intelligence - CDMB - Implementing BI-CMDB to Lower Operation Cost Expenses and Satisfy Increasing User Expectations: INTECH Open Access Publisher, zuletzt geprüft am 04.09.2017.

Zhaoxu, Sun; Min, Han (2010): Multi-Criteria Decision Making Based on PROMETHEE Method. In: 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. CCIE 2010 : proceedings : 5-6 June 2010, Wuhan, China. 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Wuhan, China, 5.-6. June 2010. Los Alamitos: IEEE, S. 416–418.

Zimmer, Konrad (2016): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl und Steuerung von Lieferanten und Lieferketten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Produktion und Energie, Band 17).

Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): Multi-Criteria-Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin [u.a.]: Springer (Heidelberger Lehrtexte. Wirtschaftswissenschaften).

Zweck, Axel (2013): Technikbewertung auf Basis der VDI-Richtlinie 3780. In: Georg Simonis (Hg.): Konzepte und Verfahren der Technikfolgenabschätzung. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer VS (Lehrbuch), S. 145–160.

9. Anhang

1. Skalen **216**

2. Weitere Bewertungsmodelle und Entscheidungsunterstützungssysteme **218**

3. Vor- und Nachteile der kompensatorischen Entscheidungsverfahren **224**

4. Methoden zur Ermittlung von Gewichtungsverteilungen **227**

4.1 Literatursichtung 227

4.2 Hintergrund zu ausgewählten Methoden 232

5. Missionsstruktur **240**

6. Klassendiagramme **241**

6.1 Berechnungsmodule 241

6.2 Datensätze der Alternativen 242

6.3 Ergebnissynthese 243

6.4 Optimizer 244

7. Berechnung des Systempotentials **245**

8. Kriterienstruktur *Umweltwahrnehmung* **246**

9. Fragebögen **248**

9.1 Bögen für Experten 248

9.2 Auswertung 261

10. Literaturverzeichnis **271**

1. Skalen

Die Skalen lassen sich nach deren unterschiedlich detaillierten Messniveaus unterteilen, welche sie bereitstellen. Es gibt vier verschiedene Typen von Skalen: Nominalskala, Ordinalskala, Intervallskala und Verhältnisskala. Das Messniveau wird dabei durch die möglichen Relationen (Informationsgehalt) und deren zulässigen Transformationen (Rechenoperationen) angegeben. Die eindeutige Bestimmung des realisierten Messniveaus (Skalenniveaus) ist wichtig für die Beurteilung der Verrechenbarkeit der Kriterienausprägung.

Nominalskala

Die Nominalskala ist die Skala mit dem niedrigsten Messniveau. Sie dient im Sinne einer „Nominaldefinition" dazu, bestimmte Objekte hinsichtlich ihrer Verschiedenartigkeiten qualitativ zu klassifizieren und zu typisieren. Bei luftgestützten Systemen lässt sich bspw. die Luftbetankungsfähigkeit mit „ja" (1) oder „nein" (0) klassifizieren. Auf diesem Messniveau sind keine arithmetischen Rechenoperationen erlaubt. Es lassen sich lediglich Äquivalenzrelationen in Form eines mathematischen Ausdrucks (gleich/ungleich) feststellen, wodurch Alternativen hinsichtlich dieses Kriteriums klassifiziert und deren Häufigkeiten ermittelt werden können (Brauchlin und Heene 1995).

Ordinalskala

Zusätzlich zur Äquivalenzaussage (gleich/ungleich) ist auf der Ordinalskala mit dem nächsthöheren Messniveau eine Ordnungsaussage (größer/kleiner) möglich. Dabei können keine Aussagen über die Abstände innerhalb der Rangordnung getroffen werden. Beispielsweise kann das Schub/Gewichtsverhältnis mit linguistischen Ausprägungen beschrieben werden, deren Rangstufen auf der Ordinalskala in Zahlen angegeben sind (z.B. hoch = 1, mittel = 2 und klein = 3). Dabei stehen die Zahlen für verbale Zuweisungen und nicht für verrechenbare Messwerte, weshalb ebenfalls keine arithmetischen Rechenoperationen zulässig und die Abstände zwischen den Ausprägungen nicht vergleichbar sind.

Intervallskala

Die erste metrische Skala ist die Differenz- oder Intervallskala, bei welcher die Abstände zwischen den Werten äquidistant sind. Die Skala weist keinen Nullpunkt auf, so dass für die Referenz der Werte ein relativer Nullpunkt zu setzen ist. Bei diesem Punkt ist die Ausprägung des Kriteriums allerdings nicht zwangsläufig tatsächlich Null. Bei intervallskalierten Ausprägungen besitzen die Differenzen zwischen den Ausprägungen ebenfalls einen Informationsgehalt (z.B. großer oder kleiner Temperaturunterschied). Damit sind arithmetische Operationen wie Addition und Subtraktion zulässig.

Oftmals werden Skalen benutzt, bei denen lediglich angenommen wird, sie seien intervallskaliert. Dies ist der Fall bei Ratingskalen: Ein Experte ordnet einer Ausprägung einen entsprechenden Skalenwert zu (z.B. 0–10). Solange die Annahme gleicher Skalenabstände unbestätigt ist, handelt es sich allerdings streng genommen um eine Ordinalskala (Backhaus 2010).

Verhältnis (Ratio)-Skala

Die Skala auf dem höchsten Messniveau unterscheidet sich von der Intervallskala durch einen „absoluten" Bezugspunkt, d.h. einen empirisch sinnvollen (z.B. Kosten) oder festgelegten (z.B. Gewicht) Nullpunkt.

„Zusätzlich zu den Aussagen über die Äquivalenz von Objekten (Nominalskala), über die Rangordnung der Objekte (Ordinalskala) und über die Differenz zwischen den Objektpaaren (Intervallskala) sind hier auch Aussagen über die Verhältnisse (Quotient) bzw. über das Vielfache von Messwerten empirisch sinnvoll."

(Kromrey et al. 2016)

Somit ist auf dieser Skala die Anwendung sämtlicher arithmetischer Rechenoperationen zulässig. Die Ratioskala ist bis auf die Maßeinheit eindeutig bestimmt, d.h. es sind nur noch lineare Transformationen der Maßeinheit (Umrechnung in eine andere Maßeinheit) zulässig. Ist keine Transformation der Skalenwerte zulässig, handelt es sich um eine Absolutskala, bei welcher die Maßeinheit ebenfalls vorgegeben ist (z.B. Anzahl der Entdeckten Objekte auf einer Straße).

	Skala	Merkmale	Rechnerische Handhabung	Beispiel
nicht metrisch	Nominal	Klassifizierung qualitativer Eigenschaftsausprägungen	Bildung von Häufigkeiten, Zuordnungen	Farbe, Nation
	Ordinal	Rangwert mit Ordinalzahlen	Median, Quantile	
metrisch	Intervall	Skala mit äquidistanten Abschnitten ohne natürlichen Nullpunkt	Subtraktion, Mittelwert	Temperatur in Celsius, Datum des Erstflugs
	Ratio (Absolut)	Nicht äquidistante Abschnitte und natürlicher Nullpunkt	Summe, Division, Multiplikation	Temperatur in Kelvin, Gewicht, Wahrscheinlichkeit

Tabelle 1: Verschiedene Skalentypen und deren Merkmale. *Auf den einzelnen Skalentypen sind unterschiedliche Rechenoperationen erlaubt, welche mit steigendem Skalenniveau zunehmen.*

Systematik: Zulässige Aussagen auf den Skalentypen

Die Frage nach der Zulässigkeit von Rechenoperationen stellt sich bei der mathematischen Verarbeitung von Kriterien und der zugehörigen Präferenzen im Rahmen eines Bewertungsverfahrens (Ruhland 2004). Die rechnerische Vermischung und gemeinsame Aggregation ordinaler und kardinaler Werte zu einer Gesamtpräferenz ist problematisch (Eisenführ et al. 2010; Zimmermann und Gutsche 1991). Allgemein gilt: Es sind nur diejenigen Aussagen über Relationen zwischen Skalenwerten zulässig (d.h. empirisch sinnvoll), deren Wahrheitswert sich nicht gegenüber legitimen Skalentransformationen ändert. Wird durch eine zulässige Transformation einer Skala eine wahre Aussage in eine falsche Aussage überführt oder umgekehrt, ist diese Art statistischer Aussagen empirisch sinnlos (vgl. Kromrey et al. 2016). Dieser Zusammenhang soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden. Es werden luftgestützte Sensorplattformen (Alternativen) hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Erfüllung einer Aufklärungsmission in eine Rangordnung (r) gebracht. Diese ergibt sich auf einer Ordinalskala zu r(A1)=4; r(A2)=3; r(A3)=2 und r(A4)=1. Folgende unzulässige (empirisch nicht sinnvolle) Aussagen könnten abgeleitet werden:

(1) Die Unterschiede bzgl. der Eignung zur Erfüllung der Mission zwischen A1 und A2 sind genauso groß wie zwischen A3 und A4.

(2) Die Unterschiede zwischen A1 und A3 sind größer als zwischen A3 und A4.
(3) Bezüglich A4 ist A3 doppelt so gut und A1 viermal so gut geeignet.

Diese Aussagen sind unzulässig, da auf den jeweiligen Messniveaus nur bestimmte Beziehungen formuliert werden können. Mit den Skalentypen können folgende Arten numerischer Aussagen (Beziehungen) unterschieden werden:

1) Äquivalenzaussage: $r(A1) = r(A2)$
2) Ordnungsaussage: $r(A1) > r(A2)$
3) Distanzaussage: $\mathrm{r(A1) - r(A2) > r(A3) - r(A4)}$
4) Verhältnisaussage: $\mathrm{r(A1) = x \cdot r(A2)}$

Die Zulässigkeit bzgl. der Aussagen über Relationen zwischen den Skalenwerten ist in Tabelle 2 dargestellt.

	Typ der Aussage			
Skalentyp	**Äquivalenz**	**Ordnung**	**Distanz**	**Verhältnis**
Nominal	+	-	-	-
Ordinal	+	+	-	-
Intervall	+	+	+	-
Ratio- u. Absolut	+	+	+	+

Tabelle 2: Zulässige Aussagen bezüglich der Relationen innerhalb der Messniveaus nach (Strassert 1995). *Ausgehend von unterschiedlichen Rechenoperationen auf den einzelnen Skalenniveaus können unterschiedliche Aussagen bzgl. der Zusammenhänge auf diesen Skalen formuliert werden.*

Zeilenweise gelesen zeigt sich, dass die Verhältnisskala (höchstes Messniveau) alle vier Beziehungen einschließt. Währenddessen schließt die Nominalskala (niedrigstes Messniveau) nur die Äquivalenzbeziehung ein. „*Praktisch bedeutet dies, dass man eine umfassende Skala zwar beschränken, nicht aber umgekehrt eine beschränkte Skala erweitern kann*“ (Strassert 1995). Durch Beschränkungen und Beziehungen kann man von der untersten Zeile immer zur obersten Zeile gelangen, nicht jedoch umgekehrt. Dies kann sinnvoll sein, um die Übersichtlichkeit der Daten zu erhöhen oder um die Analyse zu vereinfachen. Mit der Transformation auf ein niedrigeres Skalenniveau ist immer auch ein Informationsverlust verbunden (Backhaus 2010). Um die Verschiedenartigkeit der Ausprägungen der Kriterien zu berücksichtigen, ist für jedes Kriterium eine Skala vorzugeben. Eine einheitliche metrische Skala für alle Kriterien gibt es nicht; eine solche Einheitsskala kann auch nicht hergestellt werden. Der Versuch, die Ausprägungen verschiedener Kriterien auf einen einheitlichen Nutzenmaßstab zurückzuführen, indem Vektoren in Skalare umgerechnet werden, ist empirisch falsch (Strassert 1995). Die Vektoren sind als Vektoren zu behandeln und für die explizite Abwägung der Vor- und Nachteile auf den jeweiligen Messniveaus in einem strukturierten Verfahren zu berücksichtigen.

2. Weitere Bewertungsmodelle und Entscheidungsunterstützungssysteme

In diesem Kapitel werden weitere Entscheidungsunterstützungssysteme (DSS) aus ausgewählten Anwendungsbereichen vorgestellt. Aufgrund der Vielzahl an Ansätzen aus der Literatur können die einzelnen Referenzen nur einen Ausschnitte der gemachten Bemühungen zur Entwicklung von DSS darstellen.

Dem Anspruch auf Vollständigkeit kann und soll auch in Tabelle 3 nicht nachgekommen werden. Vielmehr soll eine Übersicht bzgl. weiterer DSS aus anderen Anwendungsbereichen wie bspw. Energie, Medizin und Planung gegeben werden, um die Literatursichtung für luftgestützte System aus Kapitel 3.1 abzurunden. Auf eine Aufführung der Literatur, welche keine DSS sondern nur MCDA Methoden verwendet, soll aufgrund des unermesslichen Umfangs an dieser Stelle verzichtet werden.

Autor	Untersuchungsgegenstand
Medizin	
(Bindoff et al. 2007)	Identifizierung von medikamenten-basierten Erkrankungen und Unterstützung von Pharmazeuten
(Abrahams und Ragsdale 2012)	Reduzierung der Kosten durch Verschwendung von Impfstoffen durch die Bewertung des Impfbedarfs mit einem computergestützten Entscheidungsunterstützungssystem
(Chari et al. 1998)	Aufbau eines Drogentestmodells zur Generierung von Drogentestplänen für die Reduzierung von Überwachungskosten und die Budgetplanung. Die Bewertung findet mit Heuristiken statt.
(Lin et al. 2006)	Ableitung einer Diagnose zu Schmerzen im Rückenbereich aus den Informationen des Patienten.
(van Valkenhoef et al. 2013)	System zur Wirksamkeits- und Sicherheitsbewertung medizinischer Behandlungen.
(Yet et al. 2013) (Garg et al. 2005) (Vadher et al. 1997)	Unterstützung der Entscheidungsfindung im Warfarin-Therapie Management und der Dosisanpassung und Bewertung der Blutungs- und Thromboserisiken.
(Zhuang et al. 2013)	Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Unterstützung von angemessenen und effektiven Pathologietests.
(Sim et al. 2001)	Verbesserung der Qualität der Gesundheitsvorsorge durch den Einsatz von klinischen Entscheidungsunterstützungssystemen in der evidenzbasierten Medizin.
(Pestotnik 1996)	Unterstützung des Einsatzes von Antibiotika durch die klinische und finanzielle Bewertung.
(Lobach und Hammond 1997)	Bewertung des Nutzens eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Ableitung einer Diagnose.
(Walczak et al. 2003)	Optimierung der Abläufe zur Patientenversorgung im Krankenhaus
(Dios et al. 2015)	DSS für die Planung von OP- Räumen
(Du Bois et al. 1989)	Expertensystem für die computergestützte Diagnosenstellung

Infrastruktur und Logistik	
(Coutinho-Rodrigues et al. 2011) (Jankowski et al. 2008) (Karnatak et al. 2007)	Entwicklung eines softwaregestützten Entscheidungsunterstützungssystem MCPUIS (*Multicriteria Planning of Urban Infrastructure Systems*) zur Bewertung von Investitionsmöglichkeiten.
(Natividade-Jesus et al. 2007)	Bewertung des urbanen Bauraumes und physikalischer Eigenschaften von Gebäuden.
(Koo et al. 2014)	Entwicklung eines DSS für die Ableitung der optimalen Größe eines Schnellstraßennetzes unter besonderer Berücksichtigung der Rentabilität.
(Landry et al. 2013)	Definition der Konflikte von Bodenoperationen auf Flughafenoberflächen und Validierung von Konfliktdetektions- und Auflösungslogiken.
(Murty et al. 2005)	System zur Ableitung von Entscheidungen mit der Zielsetzung die Liegezeit von Schiffen, die Ressourcen für die Bewältigung der Arbeitsbelastung sowie die Wartezeit in einem Containerterminal zu minimieren.
(Törnquist und Herbstritt 2006)	Übersicht über Entscheidungsunterstützungssysteme für Schienenfahrzeuge
(Hu und Sheng 2014)	Entwicklung eines PLISMO (*Public Logistics Information Service Management and Optimization*) Systems für das effiziente Transportmanagement.
(Basu und Nair 2014)	Entwicklung eines Systems für die Bestandskontrolle in der Lagerverwaltung zur Erstellung einer Entscheidungshilfe für die Risiko-Ertrags-Analyse.
(Fazi et al. 2015)	DSS zur Ableitung von Zeitplänen für den Transport von Containern per Binnenschiff im Binnenland.
(Gunasekaran und Ngai 2012)	Entscheidungssysteme für Lieferkettenmanagement
(Kristianto et al. 2012)	Validierung von Operationen in einer Lieferkette
(Ngai et al. 2012)	Entwurf und Entwicklung eines kontextsensitiven Flottenmanagementsystem (CFMS) Prototyps für die Echtzeit-Unfallbehandlung in der Logistik mit einem Design-Science-Ansatz
(Sahebjamnia et al. 2017)	Ermittlung der optimalen Rettungskette für unterschiedliche Szenarios wie Katastrophen größeren Ausmaßes
(Ursavas 2014)	Optimierung von Operationen an der Kaianlage eines Containerterminals unter widersprüchlichen Forderungen und Belangen
(van der Heyden und Ottjes 1985)	Planung der Arbeitsabläufe in einem Terminal zur Verladung landwirtschaftlicher Güter
(Sonneberg et al. 2015)	Optimierung der Verteilung von Car Sharing Stationen

Umwelt	
(Bochtis et al. 2012)	Entwicklung eines DSS zur Optimierung der Routenplanung hinsichtlich des minimierten Risikos für die Bodenverdichtung für landwirtschaftliche Fahrzeuge, die zeitabhängige Lasten transportieren
(Buehlmann et al. 2000)	DSS für die Holzplattenherstellung
(Dietrich 2006)	Methodik zur systemanalytischen Unterstützung adaptierbarer Entscheidungsprozesse bei der integrierten Flussgebietsbewirtschaftung
(Harth 2006)	Multikriterielle Bewertungsverfahren als Beitrag zur Entscheidungsfindung in der Landnutzungsplanung
(Nakamori und Sawaragi 1996)	Entwicklung eines interaktiven und intelligenten DSS für die Lösung von Umweltproblemen
(PanGeo 2009)	Vergleich von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen
(Rakes et al. 2014)	Bewertung von provisorischen Unterkünften nach Naturkatastrophen
(Recio et al. 2005)	Ableitung von Wassernutzungsrichtlinien , welche die Nachhaltigkeit natürlicher Ressourcen mit der regionalen Wirtschaftsentwicklung kombinieren
(Jones 1993)	Entwicklung der Landwirtschaft
(Steinmetz 2007)	Risikomanagement kontaminierter Standorte
Energie	
(Bergey et al. 2003)	Bewertung der elektrischen Energieversorgung
(Chang 2014)	Modellierung der Planung und Koordination von hybriden Systemen für erneuerbare Energien in unsicheren Umgebungen und Entwicklung einer effizienten Heuristik
(Kallestrup et al. 2014)	Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen für hierarchisch strukturierte Planungsansätze bspw. kommerziell verfügbare fortgeschrittene Planungssysteme am Beispiel der Rohölbeschaffung
(Mattiussi et al. 2014)	DSS für eine nachhaltige Anlagenplanung und -produktion im Bereich der Energieversorgung
(Oberschmidt 2010)	Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme
(Afgan et al. 2007) (Afgan und Carvalho 2008)	Bewertung der Energieversorgung verschiedener Energiequellen
(Alanne et al. 2007)	Auswahl eines Energieversorgungssystems für Wohngebäude als ein multikriterielles Entscheidungsproblem unter

	Berücksichtigung finanzieller als auch ökologischer Problemstellungen
(Browne et al. 2010)	Bewertung der Möglichkeiten zur Wärmeerzeugung in Wohngebäuden und den inländischen Stromverbrauch
(Georgopoulou et al. 1997)	Bewertung regenerativer Energien
Strategien und Finanzen	
(Andres und Poler 2016)	Bewertung der strategischen Ausrichtung von Unternehmensnetzwerken
(Beraldi et al. 2011)	System zur Vorhersage zukünftiger unsicherer Marktbedingungen und Unterstützung von Finanzakteuren
(Doumpos und Zopounidis 2010)	System zur Bankenbewertung
(Fernandez et al. 2013)	Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen
(Gottschlich und Hinz 2014)	Unterstützungssystem zur Bewertung von Investitionsmöglichkeiten
(Guelman et al. 2015)	Bewertung privater Investitionsvorhaben
(Hong und Lee 2013)	Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystem zur Abschätzung der Risiken für Beschaffungsprozesse Ableitung eines robusten Beschaffungsplans einschließlich Lieferantenauswahl und Auftragszuordnung
(Marquez und Blanchar 2006)	Bewertung von Finanzierungsmöglichkeiten und Ableitung von Kaufentscheidungen
(Ghodsypour und O'Brien 1998)	
(Zimmer 2016)	Auswahl und Bewertung von Lieferanten
(CHOU und CHANG 2008)	
(Achabal et al. 2000)	Bewertung der Bestandsüberwachung der Lieferanten für die Bestände bei den Kunden
(Sadrian und Yoon 1994)	Bewertung von Ankaufstrategien im Beschaffungsmanagement
(Papakostas et al. 2010)	System für die kurzfristige Planung der Wartungsaktivitäten eines Fluglinienbetreibers an den Flughäfen während der Turn-Around-Zeit
(Rees et al. 2011)	Entscheidungsunterstützungssystem für die Einschätzung des unsicheren Risikos, dem eine Organisation aufgrund von Cyberangriffen ausgesetzt ist, als Funktion von unsicheren Bedrohungsraten, Gegenmaßnahmenkosten und Auswirkungen auf ihre Vermögenswerte
(Prakash und Sarkar 2015)	Unterstützung hierarchischer Personalentscheidungen in Unternehmen
(Mareschal und Mertens 2012)	DSS für Bewertungen im internationalen Bankwesen

	Design und Planung
(Byun und Lee 2005)	Technologiebewertung im Rapid Prototyping
(Chiang und Che 2015)	Entscheidungsfindungsmethode für ein kohlenstoffarmes elektronisches Produktdesign
(Geldermann 1999)	Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung
(Jahan und Edwards 2013)	Auswahl von Materialien im Produktdesign
(Lei und Moon 2015)	DSS zur marktgerechten Produktpositionierung und -gestaltung basierend auf Marktdaten und Designparametern
(Xu et al. 2007)	Analyse der Merkmale einer unscharfen, mehrstufigen Evaluierung und Entscheidungsfindung im parallelen Produktentwicklungsprozess und Vorstellung eines Entscheidungsunterstützungssystem für das Produktdesign im *Concurrent Engineering*
(Choffray und Lilien 1986)	Bewertung der Marktverfügbarkeitsstrategien neuer Produkte
(Giachetti 1998)	System zur Unterstützung der Auswahl von Material im Designprozess
(Kengpol 2004)	Bewertung des Investments in neue Vertriebszentren
(Smith et al. 1997)	Planung von Bepflanzungsstrategien
(Sodtke 2003)	DSS für den Zwischenfruchtanbau

Tabelle 3: Bewertungsmodelle und Entscheidungsunterstützungssysteme aus verschiedenen Anwendungsbereichen.

3. Vor- und Nachteile der kompensatorischen Entscheidungsverfahren

In Tabelle 4 werden die gängigsten kompensatorischen Methoden der multikriteriellen Entscheidungstheorie tabellarisch gegenübergestellt und nach den Parameter zur Bewertung und Auswahl von MCDA Methoden in der Luftfahrt nach (Sun 2012) verglichen. Dies soll die Methodenauswahl aus Kapitel 4.3.2.4 ergänzen.

Übersicht	**MaxiMin/ MaxiMax**	**Hurwicz-Prinzip**	**Niehans-Savage**	**Laplace Regel**	**NKA**	**NWA**	**MAUT**
			Eingangsdaten				
Skalenniveau mind.	kardinal	kardinal	ordinal	kardinal	kardinal	ordinal	kardinal
			Voraussetzung				
Gewichtung	keine	keine	Keine	keine	Monetarisierung	Durch ET	Durch ET
Parameter/Schwellwerte	Nein	Nein	nein	nein	Nein	nein	nein
Substitutionsraten	Nein	Nein	Nein	ja	ja	ja	ja
			Modell				
Verfahren	Maximale Ausprägung	Min und Max	„Bedauerns-werte“	Bernoulli Prinzip	Monetarisierung und Aggregation	Punktewerte	Medianverfahren
Präferenzen	Keine	Keine	Keine	Keine	keine	Punktvergabe	Präferenzfunktion
Aggregation	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Kompensation	ja	Nein	ja	ja	ja	ja	ja
Paarvergleiche	Nein	Nein	Nein	nein	nein	nein	nein
Differenzbetrachtung	Nein	Nein	Nein	nein	nein	nein	nein
Indifferenzen/ Unvergleichbarkeiten	Nein	Nein	Nein	nein	nein	nein	nein
			Ergebnis				
Ergebnis	Max Wert	Max und Min Wert	Kostenwert	Erwartungswert	NKV	Nutzwert	Gesamtnutzen
Darstellung	keine	Keine	Präferenz-index	Präferenzindex	NKV	Präferenzindex	Präferenzindex
Quelle	(Laux et al. 2014)	(Laux et al. 2014)	(Laux et al. 2014)	(Laux et al. 2014)	(E. J. Mishan 1976)	(Bechmann 1978)	(Fischer 1979)

Übersicht	**SAW**	**CP**	**TOPSIS**	**GP/MOP**	**MAVT**	**MACBETH**	**SMART**
			Eingangsdaten				
Skalenniveau mind.	kardinal	kardinal	ordinal	kardinal	kardinal	ordinal	kardinal
			Voraussetzung				
Gewichtung	Durch ET	nein	Durch ET	Teilweise	Durch ET	Durch ET	Durch ET
Parameter/Schwellwerte	nein	nein	dom. Alt.	nein	nein	nein	nein
Substitutionsraten	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
			Modell				
Verfahren	Addition	Optimiza-tion	Euklidsche Distanz	Dominanz-ver-fahren	Addition	Addition	Addition
Präferenzen	Nein	Nein	Nein	nein	Utility Function	Attraktivitäts-werte	Utility Function
Aggregation	Ja	Ja	Ja	ja	Ja	Ja	Ja
Kompensation	Ja	Ja	Ja	ja	Ja	Ja	Ja
Paarvergleiche	Nein	Nein	Nein	nein	Nein	ja	Nein
Differenzbetrachtung	Nein	Nein	Ja	nein	Nein	ja	Nein
Indifferenzen/ Unvergleichbarkeiten	Nein	Nein	Nein	nein	Nein	Nein	Nein
			Ergebnis				
Ergebnis	Summe	Beste Lö-sung	Abstand zu Ideallösg.	Lexikografische Ordnung	Nutzwert	Vorzugsindex	Nutzwert
Darstellung	Präordnung	Präordnung	Präordnung	Präordnung	Präferenzindex	Rangfolge	Präferenzindex
Quelle	(Kaliszewski und Pod-kopaev 2016)	(Ballestero und Garcia-Bernabeu 2015)	(Chen 2000)	(Nakayama op. 2003)	(Belton 1999)	(Bana e Costa und Carlos A. 2012)	(Olson 2012)

Übersicht	**AHP**	**HDT**	**NAIDE**	**EVAMIX**	**ELECTRE**	**PROMETHEE**	**ORESTE**
			Eingangsdaten				
Skalenniveau mind.	kardinal	Ordinal	kardinal	Ordinal	ordinal	Ordinal	Ordinal
			Voraussetzung				
Gewichtung	Eigenvektor-methode	keine	keine	Durch ET	Durch ET	Durch ET	Durch ET
Parameter/Schwell-werte	nein	Nein	Cross-Over Werte	Nein	Konkordanz/ Diskordanz	Hierarchie	Konfliktanalyse
Substitutionsraten	Nein	nein	nein	Nein	nein	Nein	Nein
			Modell				
Verfahren	Eigenvektor-methode	Hierarchie auf-stellen	semantische Nähe	Konkordanz-analyse	Paarvergleiche + Konkordanz/ Diskordanz	Ein- Ausgangs-flüsse	Ordinale NWA + Konfliktanalyse
Präferenzen	Punktver-gabe	nein	Kriterien-spezifisch	Nutzenwerte	nein	kriterienspezifisch	Prävalenzgrad
Aggregation	ja	nein	Konkordanz	ja	ja	Gew. Differenzen	Rangaggregation
Paarvergleiche	nein	ja	ja	Nein	ja	ja	ja
Differenzbetrachtung	nein	nein	nein	Nein	ja	ja	ja
Indifferenzen/ Unvergleichbarkeiten	nein	ja	nein	nein	nein	ja	Ja
			Ergebnis				
Ergebnis	Gesamtnut-zen	Partiell geord-nete Menge	Kredibilitäts-index	Gesamt-domi-nanz-wert	nicht domi-nierter Alter-nativen	Partielle Präord-nung + Rangfolge	Partielle Präord-nung
Darstellung	Präferenz-in-dex	Graph	Präordnung	Präordnung	Gerichteter Graph	Vollständige Präordnung	Vollständige Präordnung
Quelle	(Saaty 2008)	(Rezagholiza-deh et al. 2011)	(Anton et al. 2006)	(Voogd 1982)	(Govindan und Jepsen 2016)	(Brans und Mare-schal 2005)	(Pastijn und Ley-sen 1989)

Tabelle 4: Gegenüberstellung der gängigsten kompensatorischen MCDA Methoden zur Bewertung von Luftfahrzeugen

4. Methoden zur Ermittlung von Gewichtungsverteilungen

4.1 Literatursichtung

Autor	Untersuchungsgegenstand	MCDA Methode	Gewichtungs-methode
	Wasser und Umwelt		
(Machiwal et al. 2011)	Bewertung des Grundwassers in verschiedenen Region Indiens unter der Nutzung von Fernerkundung und GIS Daten	AHP	Eigenvektormethode, paarweiser Vergleich
(Calizaya et al. 2010)	Management der Wasserressourcen in dem Lake Poopo Basin auf Basis ökonomischer, sozialer und umweltspezifischer Kriterien	AHP	Paarweiser Vergleich
(Kodikara et al. 2010)	Bewertung von Handlungsalternativen für das urbane Wasserressourcenmanagement	Promethee	SIMOS
(Supriyasilp et al. 2009)	Bewertung von Wasserkrafterzeugungsverfahren	AHP	Paarweiser Vergleich
(Balasubramaniam et al. 2007)	Bewertung von Altlastensanierungen für verseuchten Boden	Electre	SWING
(Arnette et al. 2010)	Bewertung von Wassereinzugsgebieten	AHP	Paarweiser Vergleich
(Toosi und Samani 2012)	Bewertung von Transportverfahren für Wasser	AHP	Paarweiser Vergleich
(Palma et al. 2007)	Bewertung von Landnutzungsmöglichkeiten	Promethee	-
(Panagopoulos et al. 2012)	Bewertung des urbanen Wasserbedarfs	AHP	Paarweiser Vergleich
(Bana e Costa et al. 2004)	Bewertung von Flutkontrollmaßnahmen	MACBETH	DWM
(Duarte et al. 2009)	Bewertung von Wasserversorgern	GISEQ	DWM
(Bello-Dambatta et al. 2009)	Management von kontaminiertem Boden	AHP	Paarweiser Vergleich
(Liu et al. 2006)	Bewertung von Feuchtgebietreservoiren	Topsis	DWM
(Briggs et al. 1990)	Management von nuklearem Atommüll	Promethee	DWM

(Kaya und Kahraman 2011)	Unterstützung der Energieplanung	Fuzzy Topsis	-
(Chu und Su 2012)	Auswahl von seismischen Bunkern bei der Evakuierung von Städten	Topsis	-
(Awasthi et al. 2011)	Bewertung nachhaltiger Transportmöglichkeiten	Topsis	-
(Gumus 2009)	Bewertung von Transportfirmen für gefährlichen Restmüll	AHP Topsis	DWM
(Turcksin et al. 2011)	Auswahl eines umweltfreundlichen Fuhrparks	AHP Promethee	-
(Kapepula et al. 2007) (Mergias et al. 2007) (Vego et al. 2008)	Bewertung von Optionen zum Abfallmanagement	Promethee	-
Wirtschaft			
(Özcan et al. 2011)	Ortsauswahl für Kaufhäuser	Topsis	SIMOS
(Shanian et al. 2008)	Materialauswahl	Electre	SIMOS
(Jiang und Yan 2010)	Auswahl von Kaufangeboten	Topsis	Paarweiser Vergleich
(Celik et al. 2014)	Bewertung der Kundenzufriedenheit in einem Schienenverkehrsnetz	Fuzzy Vikor	Entropie Methode
(Chou et al. 2008)	Auswahl von Unternehmensstandorten	FSAW	DWM
(Fasanghari et al. 2008)	Kundenzufriedenheit bei E-Commerce Produkten	Fuzzy Topsis	-
(Rouyendegh und Erkan 2013)	Auswahl von akademischem Lehrpersonal	Electre, AHP	Paarweiser Vergleich
(Lin et al. 2008)	Bewertung der finalen Designlösung anhand der Kundenwünsche	AHP Topsis	-
(İç 2014)	Ranking von Unternehmen	Topsis	-
(Xue et al. 2008)	Bewertung der Kundenzufriedenheit	Topsis	Variant Coefficient Method
(Li et al. 2014)	Bewertung der Kundenzufriedenheit	AHP	AHP
(Baourakis et al. 2002)	Bewertung der finanziellen Existenzfähigkeit von Agrarunternehmen	Promethee	-

(Wang und Liu 2007)	Standortauswahl für Logistikunternehmen	AHP Topsis	-
(Metzner und Sawitzky 2016)	Priorisierung von Immobilienmärkten	Electre	-
(Sun und Lin 2009)	Bewertung von Einkaufs-Webseiten	Fuzzy Topsis	-
(Aydogan 2011)	Bewertung türkischer Fluggesellschaften	AHP Topsis	-
(Araz et al. 2007) (Wang und Yang 2007)	Bewertung von Outsourcing-Entscheidungen	Promethee	-
Finanzwesen			
(Wang und Luo 2010)	Bewertung von Banken	GP, Topsis	Entropie Methode
(Seçme et al. 2009)	Leistungsbewertung von Banken	AHP Topsis	-
(Mandic et al. 2014)	Analyse von Finanzparametern	FAHP Topsis	-
(Zopounidis und Kosmidou 2008)	Bestimmung von Bankprofiten	Promethee	SMART
(Zhu et al. 2014)	Bewertung der Kreditqualität	Topsis	-
(Bilbao-Terol et al. 2014)	Bewertung der Nachhaltigkeit des Rentenfonds	Topis	Paarweiser Vergleich
(Kalogeras et al. 2005)	Bewertung der Finanzleistung von Agrar- und Ernährungsindustrie	Promethee	SWING
(Ignatius et al. 2012)	Bewertung der Finanzleistung der iranischen Automobilindustrie	Promethee	-
(Aragonés-Beltrán et al. 2014)	Investment in Solarenergie	AHP	ANP
(Zhang 2013)	Investment in Windparks	AHP Topsis	AHP
(Newell und Seabrook 2006)	Bewertung des Investments in Hotels	AHP	-
(Saracoglu 2015)	Bewertung des privaten Investments in ein kleines Wasserkraftwerk	Electre AHP	Entropie Methode
Lieferantenauswahl			
(Öztayşi und Bolturk 2014)	Bewertung von Lieferantenketten	Fuzzy	Entropie Methode

(García et al. 2010)	Bewertung von Firmen	GP, Topsis	Entropie Method
(Manoliadis et al. 2007)	Auswahl von Fabrikstandorten	GP, AHP	Paarweiser Vergleich
(Albadvi et al. 2007)	Bewertung im Aktienhandel	Promethee	DWM
(Amiri 2010)	Entwicklung von Ölfeldern	AHP, Topsis	-
(Kahraman et al. 2003) (Chan et al. 2008) (Shaw et al. 2012) (Kannan et al. 2013) (Chamodrakas et al. 2010)	Lieferantenauswahl	FAHP	-
(Kilincci und Onal 2011)	Lieferantenauswahl in einem Waschmaschinenunternehmen	FAHP	Paarweiser Vergleich
(Yang et al. 2008)	Lieferantenauswahl	AHP, Topsis	Paarweiser Vergleich
(Shemshadi et al. 2011)	Lieferantenauswahl	Fuzzy Vikor	Entropie Methode
(Pourghahreman und Rajabzadeh Qhatari 2015)	Lieferantenauswahl in einer pharmazeutischen Lieferkette	Promethee	Paarweiser Vergleich
(Deng et al. 2014)	Lieferantenauswahl mit einem Expertensystem	AHP	-
(Tam und Tummala 2001)	Auswahl eines Telefonanbieters	AHP	-
Technologie			
(Guo und Yu 2011)	Bewertung von Transportunternehmen auf der Schiene	Topsis, AHP	Paarweiser Vergleich
(Anand und Kodali 2008)	Auswahl von Fertigungssystemen	Promethee	-
(Ding 2011)	Bewertung von Alternativen	Topsis	Entropie Methode
(Madanu et al. 2015)	Bewertung von Hochgeschwindigkeitszügen	Topsis	FAHP
(Rao und Patel 2010)	Materialauswahl	MADM	Paarweiser Vergleich
(Rao et al. 2011)	Auswahl von Industrierobotern	MADM	Paarweiser Vergleich
(Le Téno und Mareschal 1998)	Lebenszyklusbewertung im Produktdesign	Promethee	DWM
(Kwon und Ko 2009)	Bewertung der Glaubwürdigkeit der Vermeidung einer nuklearen Proliferation	AHP	Paarweiser Vergleich
(Dağdeviren et al. 2009)	Auswahl von Waffen für ein Verteidigungssystem	AHP, Topsis	AHP
(Goossens und Basten 2015)	Auswahl von Wartungskonzepten von Marineschiffen	AHP	Paarweiser Vergleich

(Kahraman et al. 2007)	Technologiebewertung in Logistikunternehmen	Topsis	-
(Oeltjenbruns et al. 1995)	Ersetzen von Werkzeugen in Instandhaltungsunternehmen	AHP	-
(Yurdakul 2004)	Auswahl von Werkzeugmaschinen	AHP	ANP
(Bao et al. 2012)	Bewertung der Sicherheit auf Straßen	Fuzzy Topsis	-
(Zeng 2003)	Bewertung von Batterietechnologien	Promethee	DWM
(Kolli und Parsaei 1992)	Bewertung hochentwickelter Fertigungsverfahren	Promethee	-
(Beynon und Wells 2008)	Verbesserung der Emissionen von Verbrennungsmotoren	Promethee	-
(Dağdeviren 2008) (Tuzkaya et al. 2010)	Auswahl von Materialien und Anlagen	Promethee	DWM
Medizin			
(Amaral und Costa 2014)	Unterstützung des Krankenhausmanagements	Promethee	DWM
(Ozsahin et al. 2017)	Bewertung nuklearmedizinischer bildgebender Geräte	Promethee	Paarweiser Vergleich
(Büyüközkan und Çifçi 2012)	Bewertung der elektronischen Unterstützung im medizinischen Sektor	Topsis	DWM
(Büyüközkan et al. 2011)	Bewertung der Krankenhausqualität	FAHP	Entropie Methode
(Shafii et al. 2016)	Bewertung der Servicequalität in Krankenhäusern	Topsis	-
(Akdag et al. 2014)	Bewertung der Servicequalität in Krankenhäusern	Fuzzy AHP Topsis	-
(Rahman und Qureshi 2009)	Bewertung der Qualität in der Gesundheitsfürsorge	Topsis	-
(Sennaroglu und Tuzkaya 2016)	Bewertung der Versorgungsqualität in Krankenhäusern	Promethee	DWM
(Zhao et al. 2013)	Verbesserung der Effizienz in Notaufnahmen	Promethee	-
(Ju und Wang 2012)	Auswahl von Notfallaufnahmen	AHP Topsis	DWM

(Zhang und Fu 2012)	Bewertung der medizinischen Versorgung	AHP	-
(Ashour und Okudan 2010)	Patientenverteilung in Krankenhäusern	AHP SAW	-
(Vahidnia et al. 2009) (Senvar et al. 2016)	Standortauswahl von Krankenhäusern	AHP Topsis	DWM
(Lin und Tsai 2010)	Ortauswahl für Krankhäuser in China	ANP Topsis	DWM

Tabelle 5: MCDA- Methoden bei Bewertungsprozessen

4.2 Hintergrund zu ausgewählten Methoden

Trade-Off Methoden

Während Dekompositorische Verfahren wie *Rangfolge Verfahren*, *Matrix-Verfahren* und *Direct Rating Verfahren* die Gewichtungsverteilungen ohne Betrachtung der Alternativen und deren Ausprägungen ermitteln können, nutzen die *Trade-Off Verfahren* die Ausprägungen der Alternativen zur Bestimmung der Gewichtungen (Rohr 2004). Es werden jeweils Alternativenpaare gesucht, welche sich in nur zwei Kriterien unterscheiden und vom ET als gleichgewichtet betrachtet werden (Keeney und Raiffa 1994). In einem iterativen Prozess werden relative Austauschraten ermittelt. Probleme ergeben sich, wenn zwischen zwei Ausprägungen ein so hoher Präferenzunterschied besteht, dass dieser durch keine Veränderung kompensiert werden kann (Eisenführ et al. 2010). Aufgrund der sukzessiven Eingrenzung der Indifferenzen (Trade-Offs) ist eine enorm hohe Anzahl an Abwägungen notwendig, um eine Mindestzahl an Trade-Off Messungen zu erzeugen. Dabei ist für jedes Zielpaar (zwei Elementare Kriterien) ein Trade-Off zu erfragen, was bei vielen Kriterien nicht zielführend ist (Nitzsch 2011). Weiterhin erfordern diese Verfahren vom ET Präferenzurteile für die vollständig definierte Alternativenmenge und damit die gleichzeitige Betrachtung aller Ausprägungen in allen Alternativen für alle Ziele. ET sind allerdings nicht in der Lage, „*ihre Präferenzurteile in der von der Theorie geforderten Beziehung zur Bandbreite zu modifizieren*“ (Nitzsch 1992). Daher sind für die Ableitung der Gewichtungen die *Trade-Off Verfahren* nicht geeignet.

Equal Weight Method

Der einfachste Weg zu einer Gewichtungsverteilung führt über die Gleichgewichtungsmethode (*Equal Weights Method*), welche in zahlreichen Entscheidungsproblemen Anwendung findet. Diese Methode ist auch als *Methode der direkten Punktvergabe* (*Point Allocation*) bekannt und zwingt den ET dazu, die jeweiligen Gewichtungen der Kriterien direkt auf einer festgelegten Skala zu verteilen, so dass die Präferenz des ET widergespiegelt wird. Dazu gibt es unterschiedliche Ansätze; einmal wird eine Gesamtpunktzahl von 100 vorgegeben und diese dann auf die entsprechenden Kriterien verteilt oder der ET kann beliebig viele Punkte für die Kriterien vergeben. Nach anschließender Normierung wird daraus die Gewichtungsverteilung abgeleitet. Insgesamt sind die ermittelten Gewichtungen nicht sehr präzise und können leicht zu einer Überforderung des ET führen. Generell hat der Mensch Schwierigkeiten, seine Präferenzen zu verbalisieren und diese weiterführend zu quantifizieren (Bottomley et al. 2000). Das Vorgehen ist sehr einfach, allerdings wird es mit steigender Zahl der Kriterien für den ET nicht beherrschbar.

Ranking Verfahren

Die Ranking Methode stellt ebenfalls einen einfachen Ansatz für die Zuordnung von Gewichtungen bereit. Dazu werden die Kriterien hinsichtlich ihrer Wichtigkeit in eine Rangfolge gebracht. Dabei stimmt die Zahl der Ränge mit der Zahl der Kriterien überein. Zur Ermittlung der Gewichte gibt es nach (Malczewski 1999) mehrere Möglichkeiten, so bspw. die:

- Summenbildung (*Rank Sum*): Die Rangposition bildet das Gewicht, welches anschließend normalisiert wird und die schlussendliche Gewichtung darstellt. Mit *n* Kriterien erhält der Rangplatz *r* die Gewichtung n-r+1.
- Reziproke Rangfolge (*Reciprocal Rank*): Zu den jeweiligen Rängen wird das Reziproke gebildet, welches gleichzeitig die Gewichtung darstellt. Der Rangplatz erhält die Gewichtung 1/r.
- Exponentenmethode (*Exponent Method*): Ist ähnlich der Summenbildung, wobei anschließend eine Verrechnung mit einem Exponenten stattfindet. Mit *n* Kriterien erhält der Rang *r* die Gewichtung $(n-r+1)^e$, wobei *e* zwischen [0,1] liegt.

Den Ranking Verfahren sehr ähnlich sind auch die *Trade-Off*, die *SWING* und die *SMART* Methode. Aufgrund ihrer Einfachheit finden diese Methoden ebenfalls weitreichende Anwendung. Gleichzeitig liefern sie einen zufriedenstellenden Ansatz für die Ermittlung der Gewichtungen (Malczewski 1999). Der Einsatz dieser Methode ist allerdings stark durch die Anzahl der Kriterien begrenzt. Bei der Betrachtung einer Vielzahl von Kriterien ist dieser Ansatz aufgrund der eingeschränkten theoretischen Fundierung zur Erhebung der Gewichtung bei einer komplexen Bewertungsaufgabe in der Luftfahrt nicht geeignet.

SIMOS Verfahren

Mit dieser subjektiven Gewichtungsmethode hat der ET die Möglichkeit, eine Reihung der Kriterien mit visueller Unterstützung vorzunehmen. Der ET nutzt Karten (welche die jeweiligen Kriterien repräsentieren) und bringt durch verschieben der Karten diese in eine Rangfolge. Die Abfolge ist nach (Figueira und Roy 2002):

- Bilden einer Rangfolge
- Ermittlung der Abstände zwischen Rängen mit weißen Karten als Platzhalter
- Aus der Anzahl der Kriterien und den Rangplätzen wird dann die skalare Gewichtung über eine lineare Interpolation berechnet. Das Verhältnis *f* beschreibt das Verhältnis zwischen wichtigstem und unwichtigstem Kriterium, r_{min} und r_{max} beschreibt die niedrigste und höchste Rangposition.

$$G = r_{\min} + (f-1) \cdot \frac{r - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \tag{1}$$

- Ermittlung der normalisierten Gewichtungsverteilung

Ausgehend von dem Nutzen und der Einfachheit wird dieses Vorgehen auf unterschiedliche Problemfälle angewandt. Ein Überblick über die vielfältigen Einsatzbereiche lässt sich in (Siskos und Tsotsolas 2015) finden. Dennoch stellt dieses Vorgehen keine repräsentative Ableitung der Gewichtungsverteilung sicher. Während das Bilden der Rangfolge einen nebulösen und nicht eindeutigen Vorgang darstellt (Figueira und Roy 2002), sorgt die Abstandsermittlung zwischen den Kriterien für eine realistische Repräsentation der Präferenzen. Aus diesem Grund ist der ausschließliche Einsatz dieser Methode für die Zielsetzung

dieser Arbeit nicht geeignet. Gleichwohl ist eine Kombination mit anderen Methoden – welche die ersten Punkte des Vorgehens unterstützen – anzustreben.

Direct-Rating Verfahren

Nach (Eisenführ et al. 2010) findet dieses Vorgehen trotz seiner Unzuverlässigkeit eine weite Verbreitung. Der ET hat die Aufgabe, die Wichtigkeiten der Kriterien mit entsprechenden Zahlenwerten auf einer festgelegten nominalen Skala (bspw. Likert-Skala) anzugeben. Dabei werden die Kriterien in eine Reihenfolge gebracht. Anschließend wird das unwichtigste mit dem nächst wichtigeren Kriterium verglichen und über Punktwerte bewertet. Das genaue Verfahren lässt sich in (Eisenführ et al. 2010) oder (Bottomley et al. 2000) nachlesen. Diese Methode wird als unzuverlässig eingeschätzt (Zardari et al. 2015) und soll deshalb nicht weiter berücksichtigt werden.

Analytischer Hierarchieprozess

Der Analytische Hierarchieprozess (*Analytic Hierarchie Process*, AHP) dient zur Behandlung von Entscheidungsproblemen, welche eine hierarchische Strukturen von Kriterien aufweisen (Saaty 1990). AHP basiert auf der Idee, das hierarchische Entscheidungsproblem in eine Reihe von paarweisen Vergleichsmatrizen zu übersetzen und die Präferenzinformation für die Alternativen über das Eigenvektorverfahren zu ermitteln. Bei dem klassischen Paarvergleich werden die Alternativen paarweise miteinander verglichen, bis schließlich eine überlegene Alternativen ermittelt werden kann. Dieses „*King of the Mountain*" Prinzip findet in der Praxis aufgrund deren Einfachheit eine häufige Verwendung. Der Prozess bietet allerdings keine Unterstützung bei multiplen Bewertungskriterien. Dadurch wurde die Paarvergleichsmatrix eingeführt, womit Alternativen nicht sukzessive nacheinander, sondern gleichzeitig miteinander verglichen werden können (Müller-Herbers 2007). Diese Paarvergleichsmatrix ist Ausgangspunkt für die Entwicklung des gewichteten Paarvergleichs, um Nutzerpräferenzen zu berücksichtigen. Dieser angepasste AHP ist eine formalisierte Methode der präskriptiven (oder normativen) Entscheidungstheorie, die dem ET Verfahren und Vorgehensweisen zur Verfügung stellt, um zu einer sinnvollen bzw. nachvollziehbaren (rationalen) Entscheidung zu gelangen (Manthey 2007). Der ET löst das Entscheidungsproblem, indem er – basierend auf definierten Zielkriterien und individuellen oder gruppenspezifischen Prioritäten – die nutzenmaximierende Alternative systematisch identifiziert.

Zur Formulierung der Wichtigkeit eines Kriteriums bzw. einer Alternative über eine andere wird von (Saaty 1990) eine Intervallskala von 1 bis 9 vorgeschlagen. In Tabelle 6 ist beispielhaft eine Paarvergleichsmatrix dargestellt. Es gibt weitere postulierte Skalenverläufe, welche allerdings wenig Einfluss auf die resultierende Gewichtung haben. Für den AHP hat sich die 1-9 Skala als praktikabelste herausgestellt, da sie das geringe menschliche Differenzierungsvermögen berücksichtigt (Rohr 2004). Die Prioritäten werden im Sinne von Größenvergleichen ermittelt, wobei sich die Diagonalen immer als reziproke Werte ergeben. Die Errechnung der Gewichte erfolgt über den Eigenwert und die Eigenwert-

	μ_1	μ_2	μ_3
μ_1	-	5	8
μ_2	1/5	-	3
μ_3	1/8	1/3	-
	0.74	0.18	0.08

Tabelle 6: Qualitative Vergleichsmatrix für AHP. *Der symmetrische Aufbau führt dazu, dass nur eine Hälfte ausgefüllt werden muss, während sich die übrige Hälfte aus den entsprechenden reziproken Werten eraibt.*

methode. Die resultierenden Eigenvektoren werden als Kriteriengewichte interpretiert, welche schlussendlich eine Rangordnung zulassen. Für eine genauere Beschreibung des Vorgehens sei an dieser Stelle auf (Saaty 2008; Greco et al. 2016) verwiesen.

In einer allgemeinen Entscheidungsumgebung können nicht die genauen Werte der Gewichtungen bestimmt werden, da jeder Experte oder ET kleine Fehler im Urteil machen kann. Aus der Eigenwerttheorie (Wilkinson 2009) ist bekannt, dass eine kleine Störung um einen einfachen Eigenwert zu einem Eigenwertproblem führt. Um sicherzustellen, dass die Meinung des Experten über alle n Kriterien reflektiert wird, hat (Saaty 1990) den Konsistenzindex entwickelt. Dieser basiert auf der Idee, dass bei vollkommener Konsistenz der Paarvergleichsurteile in der Matrix A zu dieser ein Eigenwert λ (Dimension n) mit einem zugehörigen Eigenvektor w existiert. Das entstehende Eigenwertproblem lautet:

$$Aw = \lambda w, \text{ mit } \lambda \in R \tag{2}$$

Dieser Konsistenzindex (CI) wird mit der Gleichung

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \tag{3}$$

berechnet. Aufbauend darauf kann das Konsistenzverhältnis bestimmt werden, welches eine Aussage über die Nutzbarkeit der Paarvergleichsurteile zulässt.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{4}$$

Der Random Index (RI) ist ein durchschnittlich gebildeter, von n abhängiger Konsistenzindex[1]. Wenn das Verhältnis (genannt Konsistenzverhältnis CR) von CI zu dem von zufälligen Matrizen signifikant klein ist (sorgfältig angegeben, um etwa 10% oder weniger zu sein), ist die Gewichtung konsistent. Andernfalls sind die Paarvergleichsurteile zu überarbeiten. Die Herleitung des Konsistenzindex und des Konsistenzverhältnisses kann in (Saaty 1990) nachgelesen werden. Für die Matrix aus Tabelle 6 ergibt sich der maximale Eigenwert aus der $\lambda_{\max}$-Methode (Csutora und Buckley 2001) zu $\lambda_{max}=3{,}04$, der Konsistenzindex zu $CI=0{,}022$ und der Konsistenzwert zu $CR=3{,}8\%$. Damit sind die Paarvergleichsurteile konsistent angegeben, so dass keine Überarbeitung notwendig wäre.

Der AHP bietet eine einfache Möglichkeit, ein Entscheidungsproblem zu formulieren und Präferenzinformationen hervorzurufen, da es nur paarweise Vergleiche zwischen Kriterien bzw. Alternativen erfordert. Allerdings hat dieses Verfahren einige Einschränkungen. Die vollständige Durchführung der paarweisen Vergleiche ist keine triviale Aufgabe für den ET und kann zu Inkonsistenzen führen. Diese Probleme verdichten sich mit zunehmender Größe der paarweisen Vergleichsmatrix[2]. Während die Reihenfolge der paarweisen Vergleiche keinen Einfluss hat, weißt die zunehmende Matrixgröße einen erheblichen Einfluss auf die Konsistenz auf (Bozóki et al. 2013). Die ermittelte Wertigkeit der Kriterien liegt in äquidistanten Abständen vor, so dass die Gewichtungen ausschließlich auf einer ordinalen Skala ermittelt

[1] (Saaty 2011) gibt verschiedene Werte für den *Random Index* abhängig von der Dimension des Eigenvektors an.
[2] Siehe *Transitivitätsaxiom* in (Laux et al. 2014)

werden. Durch das paarweise Abwägen der Kriterien kann bspw. nicht repräsentiert werden, dass Kriterium 1 und 2 hinsichtlich ihrer Wichtigkeit näher zusammenliegen als Kriterium 3 und 4. Damit eignet sich der AHP nur eingeschränkt zur Ableitung von Gewichtungen als Teil des Zielsystems.

Fuzzy AHP

Vor allem bei der Gewichtungsfindung wird der ET mit Zweifeln, Problemen und Unsicherheiten hinsichtlich resultierender Konsequenzen konfrontiert. Weiterhin bedienen sich viele Fachexperten verbaler Ausdrücke, um Besonderheiten oder Ausprägungen zu beschreiben (Bogaschewsky et al. 2010). Mathematische Modelle, welche ein derartiges System beschreiben, helfen dem ET bei dem Verständnis des komplexen Problems (Margaliot 2007). Nach (Önüt et al. 2009) ist aufgrund der Unsicherheit im menschlichen Urteilsvermögen eine Vergabe von exakten Gewichtungswerten nahezu unmöglich. Dies äußert sich mit Ausdrücken wie „wahrscheinlich" oder „vielleicht", welche oft zur Beschreibung von Sachverhalten genutzt werden. Die Gewichtungen werden nicht durch messbare Daten gestützt und sind daher über linguistische Attribute vom ET zu beschreiben. Zur Modellierung solcher subjektiven Unsicherheiten zur Wiedergabe von Präferenzen wurde die Fuzzy Logik entwickelt (Zadeh 1965), welche Ungenauigkeiten durch unscharfe Mengen berücksichtigt.

Eine typische Darstellung ungenauer Informationen ist die trianguläre Menge, welche durch die charakteristischen Werte *l*, *m* und *u* bestimmt wird. Ein Beispiel ist in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzliche Maße für die Unsicherheit sollen hier nicht betrachtet werden. Der Zugehörigkeitsgrad wird meist mit einem Wert zwischen 0 und 1 festgelegt. Er stellt die Größe dar, welche die subjektive Beurteilung eines Sachverhaltes widerspiegelt (Schulte 1993) und gibt an, in welchem Maß ein Element *x* zur Menge *A* gehört. Die entsprechende Zugehörigkeitsfunktion *μ(x)* für die trianguläre Fuzzy-Menge zwischen der *l* und *u* - Grenze lautet:

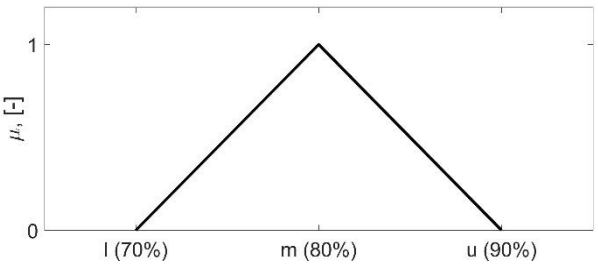


Abbildung 1: Triangulare Fuzzy-Menge. *Zugehörigkeitsfunktion einer linguistischen Variablen wie „etwas" oder „ziemlich".*

$$\mu(x) = \begin{cases} \dfrac{x-l}{m-l}, l \le x \le m \\ \\ \dfrac{u-x}{u-m}, m \le x \le u \end{cases} \tag{5}$$

Angenommen das Element x sei die *Aufklärungsleistung* eines luftgestützten Systems und der Begriff *„gute Aufklärungsleistung"* sei durch die Fuzzy Menge aus Abbildung 1 beschrieben. Bei *x=75%* beträgt die Zugehörigkeit zur Menge der *„guten Aufklärungsleistung"* *μ=0,5* (und 0,5 zu *„befriedigende Aufklärungsleistung"*) und bei *x=85%* beträgt die Zugehörigkeit ebenfalls *μ=0,5* (und 0,5 zur *„sehr gute Aufklärungsleistung"*). Für die Grundlagen zur Fuzzy Theorie sei an dieser Stelle auf (Schulte 1993) verwiesen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Fuzzy Logik ist die Verknüpfung von Fuzzy Mengen, wozu spezielle Operatoren definiert sind. Um dem ET die Beurteilung der Wichtigkeiten innerhalb des AHP zu vereinfachen und genauere Ergebnisse abzuleiten, kann eine Präferenz mithilfe linguistischer Variablen wiedergegeben werden. Das Ziel dieses Ansatzes liegt darin, durch die Orientierung an der natürlichen Sprache die Komplexität zu reduzieren und ein repräsentatives Ergebnis abzuleiten. Dazu werden die linguistischen Variablen durch Fuzzy-Mengen auf einer numerischen Werteskala abgebildet (Bogaschewsky et al. 2010), wodurch Zwischenwerte auf den diskreten Werteskalen ausgedrückt werden können. Für die Nutzung der linguistischen Variablen stellt die Literatur unterschiedliche Skalen bereit, welche zwischen sieben und neun variieren (Herrera et al. 2008). Nach (Bogaschewsky et al. 2010) lehnt sich die 9-Punkte-Skala besser an das Konsistenzverhalten des menschlichen Urteilsvermögens an. In Abbildung 2 sind die linguistischen Ausprägungen und die entsprechenden Mengen dargestellt. Die Skaleneinteilung wurde von (Bogaschewsky et al. 2010) übernommen.

Linguistische Variablen	[l; m; u]
Gleiche Bedeutung (*GB*)	[1;1;2]
Geringfügig größere Bedeutung (*GGB*)	[1.5;2.5;3.5]
Wesentlich größere Bedeutung (*WGB*)	[3;4;5]
Erheblich größere Bedeutung (*EGB*)	[4;5;6]
Viel größere Bedeutung (*VGB*)	[5;6;7]
Sehr viel größere Bedeutung (*SVGB*)	[6.5;7.5;8.5]
Absolut Dominierend (*AD*)	[8;9;9]

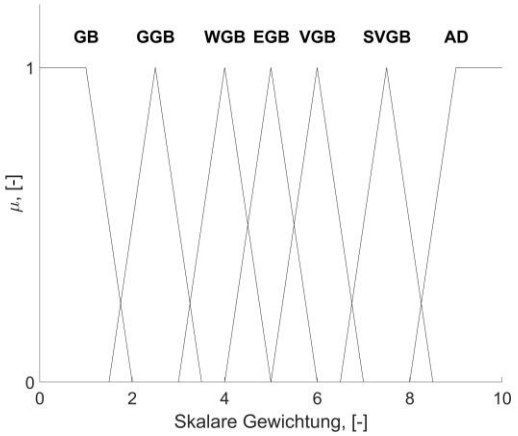


Abbildung 2: Linguistische Variable und zugehörige Fuzzy-Mengen. *Die oberen und unteren Grenzen der Zugehörigkeitsfunktionen sind mit u und l, der Mittelwert wird mit m definiert. Die dargestellten Mengen beschreiben die Zugehörigkeit einer Gewichtung zu einer entsprechenden linguistischen Variablen in Form eines Zugehörigkeitswertes μ.*

Da zur Berechnung der Gewichtungsvektoren das normierte arithmetische Zeilenmittel für inkonsistente Vergleichsmatrizen nicht geeignet ist (Bogaschewsky et al. 2010) – diese allerdings bei der Fuzzyfizierung entstehen können – wird auf die klassische Methode zur Berechnung der maximalen Eigenwerte mit der λ_{max}- Methode (Csutora und Buckley 2001) zurückgegriffen. Diese Methode ist nach (Saaty und Hu 1998) die einzig gültige Methode, um einen Prioritätenvektor zu erzeugen.

Für die Defuzzyfizierung sind in der Literatur verschiedene Vorgehen wie bspw. das *Schwerpunktverfahren*, das *Verfahren der maximalen Höhe* oder das *erweiterte Analyseverfahren* zu finden (Schulte 1993). Letzteres stellt kein geeignetes Vorgehen dar, da es zu irrationalen Entscheidungen führen kann (Bogaschewsky et al. 2010). Dies kann durch die Nutzung der *Schwerpunktmethode* ausgeschlossen werden, weshalb diese im Folgenden Anwendung finden soll. Bei dieser Methode (Tesfamariam und Sadiq 2006) wird der Abszissenwert x_0 als Flächenschwerpunkt unterhalb der Zugehörigkeitsfunktion einer Menge bestimmt. Die Menge ist gegeben als: $a = (l; m; u)$.

Zur Defuzzyfizierung wird folgende Schwerpunktformel genutzt:

$$defuzz(a) = x_0(a) = \frac{\int_0^1 x \cdot \mu_a(x)dx}{\int_0^1 \mu_a(x)dx} = \frac{\frac{1}{3} \cdot (-l \cdot m + u \cdot m - l^2 + u^2)}{u - l} \tag{6}$$

Das Vorgehen soll am Beispiel der Gewichtungsfindung für die Kurvenflugleistung (*Turn Performance*) eines Kampfflugzeuges verdeutlicht werden. Die reziproke Paarvergleichsmatrix wird mit entsprechenden Fachexperten (Piloten) auf Basis von Paarvergleichen ermittelt. Eine beispielshafte Paarvergleichsmatrix ist in Tabelle 7 aufgeführt. In den Zeilen und Spalten sind Kriterien für die Bewertung der Kurvenflugleistung aufgetragen. Diese sind die *stationäre Wenderate* (STR), die *instationäre Wenderate* (ITR), die *beste Kurvengeschwindigkeit* (CV), die *spezifische Überschussleistung* bei der besten Kurvengeschwindigkeit (SEP@CV), der *minimale Kurvenradius* (minTR), die *Combat Cycle Time* (CCT) und die *Pointing Margin* (PM) (Liefer et al. 1992). In den Zellen sind für jeden Paarvergleich die triangulären Fuzzy Mengen aufgelistet, welche an die linguistischen Variablen angelehnt sind.

J =	STR	ITR	CV	minTR	SEP@CV	CCT	PM
STR	-	EGB [4;5;6]	AD [8;9;9]	EGB [4;5;6]	VGB [5;6;7]	SVGB [6.5;7.5;8.5]	EGB [4;5;6]
ITR	~ EGB [1/6;1/5;1/4]	-	VGB [5;6;7]	GB [1;1;2]	WGB [3;4;5]	EGB [4;5;6]	GB [1;1;2]
CV	~AD [1/9;1/9;1/8]	~VGB [1/7;1/6;1/5]	-	~ WGB [1/5;1/4;1/3]	~ WGB [1/5;1/4; 1/3]	~ GGB [1/3.5;1/2.5; 1/1.5]	~ EGB [1/6;1/5; 1/4]
minTR	~ EGB [1/6;1/5;1/4]	~ GB [1/2;1;1]	WGB [3;4;5]	-	GGB [1.5;2.5; 3.5]	WGB [3;4;5]	GB [1;1;2]
SEP @CV	~ VGB [1/7;1/6;1/5]	~ WGB [1/5;1/4;1/3]	WGB [3;4;5]	~ GGB [1/3.5;1/2.5; 1/1.5]	-	GGB [1.5;2.5;3.5]	~ GGB [1/3.5;1/2.5; 1/1.5]
CCT	~ SVGB [1/8.5;1/7.5; 1/6.5]	~ EGB [1/6;1/5;1/4]	GGB [1.5;2.5;3.5]	~ WGB [1/5;1/4;1/3]	~ GGB [1/3.5;1/2.5; 1/1.5]	-	~ WGB [1/5;1/4; 1/3]
PM	~ EGB [1/6;1/5;1/4]	~ GB [1/2;1;1]	EGB [4;5;6]	~ GB [1/2;1;1]	GGB [1.5;2.5; 3.5]	WGB [3;4;5]	-

Tabelle 7: Fuzzy- Paarvergleichsmatrix eines Piloten für den ordinalen Vergleich der Wichtigkeit der Kind-Kriterien für die Kurvenflugleistung. *Ausgehend von der Matrix mit linguistischen Variablen werden die entsprechenden Mengen bestimmt und diese weiterführend in normierte Eigenvektoren und die Fuzzy-Gewichte überführt.*

Die diagonalen Einträge der Matrix ergeben sich zu $j_{ij}=1;\ i=j$. Die reziproken Einträge ergeben sich zu: $j_{ij} = 1/j_{ij} = (l_{ji};\ m_{ji};\ u_{ji})^{-1}$. Die betrachteten Kriterien sind relevante Kind-Kriterien zur Bewertung der Kurvenflugleistung. Die Matrix J ist weiter in die scharfen Matrizen J_l (erste Einträge der Zellen), J_m (mittlere Einträge der Zellen) und J_u (letzte Einträge der Zellen) zu unterteilen. Die Eigenvektoren werden über die mittleren maximalen Eigenwerte (Csutora und Buckley 2001) nach der λ_{max}- Methode bestimmt und ergeben sich zu $\lambda_{l,max} = 5{,}911$; $\lambda_{m,max} = 7{,}35$; $\lambda_{u,max} = 9{,}27$. Der *Konsistenzindex* beträgt 4,5% und liegt damit unter 10%, wodurch die Paarvergleichsmatrix konsistent ist (Saaty 1990). Die zugehörigen Eigenvektoren ergeben sich zu:

$$w_l = (0{,}4798; 0{,}1621; 0{,}0289; 0{,}1160; 0{,}0633; 0{,}0387; 0{,}1111)^T$$
$$w_m = (0{,}4638; 0{,}1512; 0{,}0261; 0{,}1254; 0{,}0658; 0{,}0389; 0{,}1289)^T$$
$$w_u = (0{,}4379; 0{,}1691; 0{,}0259; 0{,}1333; 0{,}0707; 0{,}0402; 0{,}1228)^T$$

Danach erfolgt eine Anpassung der Fuzzy-Gewichte über sogenannte *abhängige Konstanten*, welche die Verhältnisse der Mittelwerte zu den Grenzen bilden. Sie dienen zur Überprüfung der Bedingung $w_{il} \leq w_{im} \leq w_{iu}$. Zuletzt sind die Fuzzy-Gewichte zu einem Gewichtungsvektor durch die Nutzung von mathematischen Rechenoperationen (Addition, Multiplikation) zusammenzufassen. Für die Defuzzyfizierung wird der *Yager Centroid Index* als gängige Methode zur Bestimmung des Flächenschwerpunktes genutzt (Tesfamariam und Sadiq 2006). Damit lässt sich das Fuzzy-Gewicht in einen scharfen Wert umwandeln. Die resultierenden Gewichtungen ergeben sich zu:

$$w = (0{,}4605; 0{,}1608; 0{,}0270; 0{,}1249; 0{,}0666; 0{,}0393; 0{,}1209)^T$$

5. Missionsstruktur

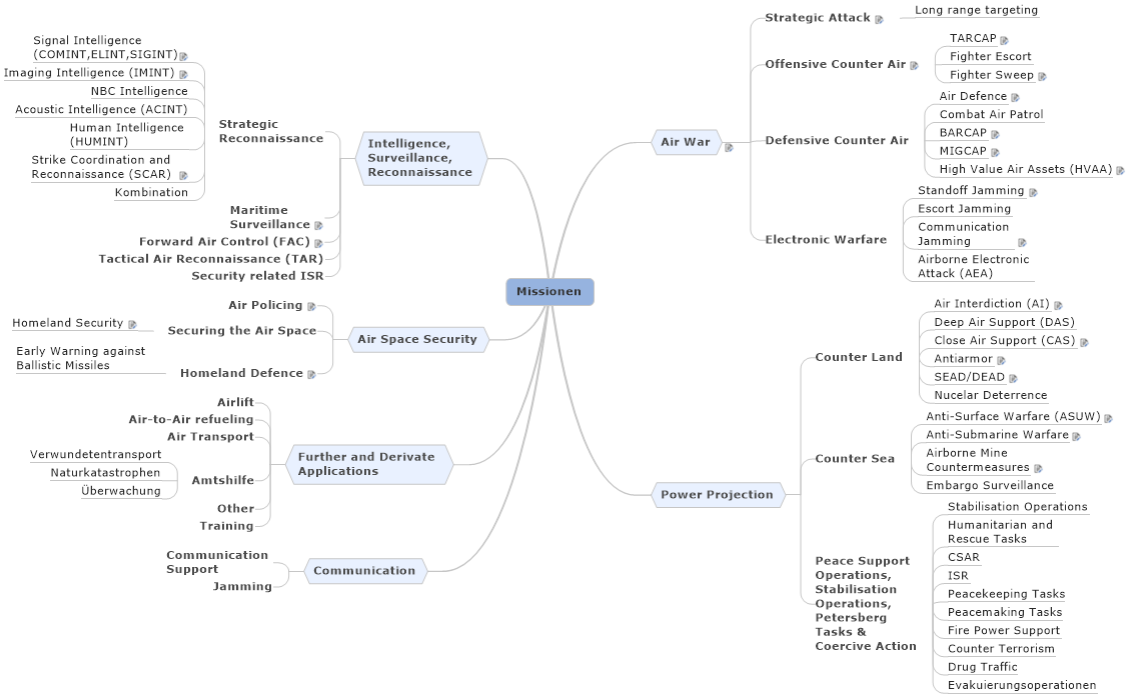


Abbildung 3: Missionsstruktur zur Auswahl der Nutzenabsicht. *Aus dieser Struktur kann der ET seine Nutzenabsicht zusammenstellen. Dabei wurde nicht für jede Mission ein A-Priori Wissen aufgebaut. Die Missionen Tactical Air Recconaissance sowie Air Defence wurden entsprechend betrachtet.*

6. Klassendiagramme

6.1 Berechnungsmodule

Die Klasse *MSE* enthält als Attribute bspw. die zu betrachtenden Alternativen inklusive deren Datensätze, die Pfade für die entsprechenden Berechnungsmodule sowie die *Elementaren Kriterien*. Ausgehend von dieser Elternklasse erben alle weiteren Klassen zur Berechnung der *Elementaren Kriterien* für die entsprechenden Fähigkeiten. Die Struktur für die Flugleistungen soll etwas genauer erläutert werden. An der Spitze der Struktur steht die *PerformanceCalculation* Klasse, welche eingebettete Klassen für die Berechnung der Wenderate (*TurnPerformance*) oder der spezifischen Überschussleistung (*SEP*) enthält. Diese erben ihre Attribute und Methoden von einer Elternklasse namens *SuperClass*, welche ebenfalls an die beiden Ressourcen *MissionPerformance* und *PointPerformance* vererbt, welche wiederum als Elternklassen dienen (bspw. *PointPerformance* für *SEP*, *TurnPerformance*, *Acceleration* und *ClimbPerformance*). Die Methoden zur Berechnung der Kriterien sind in den entsprechenden Klassen enthalten. Gleiches gilt für die Berechnung der Missionsleistungen. Die Datensätze der zu berechnenden Alternativen werden in *PointPerformance* importiert und stehen damit allen erbenden Klassen zur Verfügung. Die zu betrachtende Konfiguration kann über das Modul *Configuration* berücksichtigt werden. Dies enthält Attribute

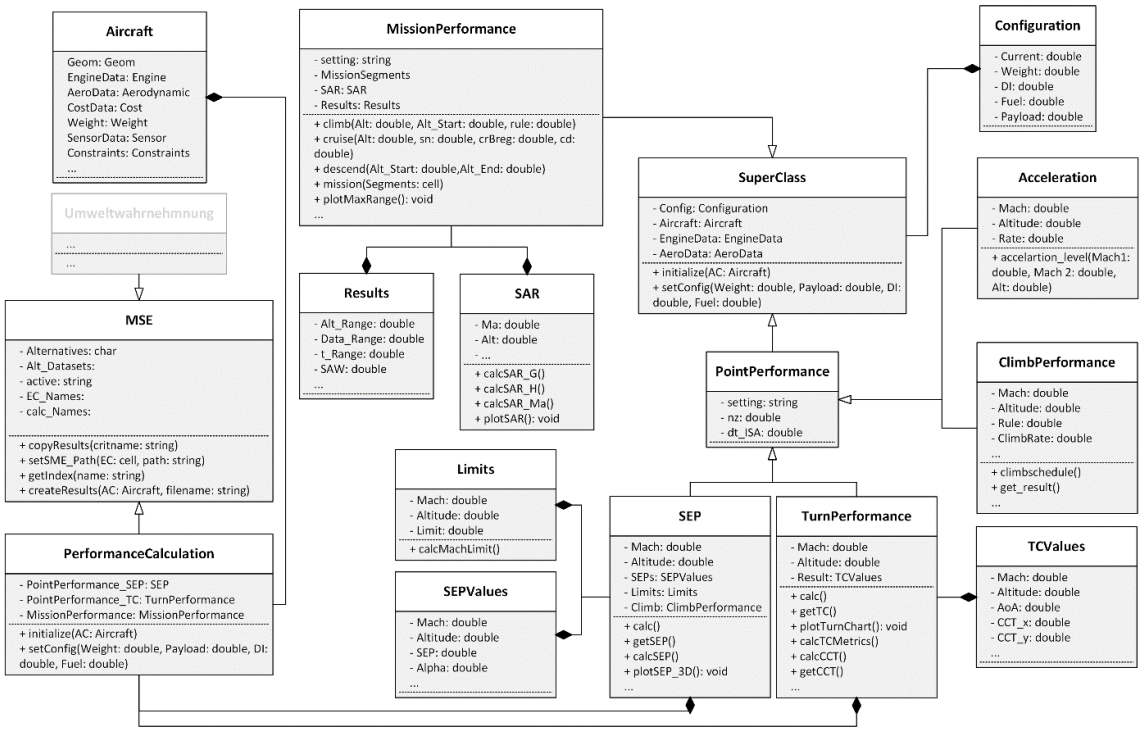


Abbildung 4: Klassendiagramm der Berechnungsumgebung am Beispiel der Flugleistung. *In diesem Ausschnitt aus der Programmstruktur zur Berechnung der Ausprägungen sind nur die entsprechenden Module für die Flugleistungen dargestellt. Die übrigen Bereiche wie bspw. die Umweltwahrnehmung sind nur qualitativ aufgeführt und werden zum Erhalt der Übersichtlichkeit nicht näher ausgeführt.*

wie bspw. Gewicht, Kraftstoff, zusätzliche Widerstandsfläche[3] oder Nutzlast. Nachdem die Datensätze der Alternativen importiert und konfiguriert wurden, können diese von allen berechnenden Modulen genutzt werden.

6.2 Datensätze der Alternativen

Die Alternativen werden über die Klasse *Aircraft* abgebildet. Diese enthält weitere Klassen für die spezifischen Datensätze wie bspw. Aerodynamik (*Aerodynamics*), Triebwerk (*Engine*), Sensor (*Sensor*) und Gewicht (*Weight*), welche teilweise weitere integrierte Module wie bspw. Auftrieb (*DATCOM*) oder Widerstand (*Drag*) enthalten. In Abbildung 5 ist erneut ein Ausschnitt aus der Klassenstruktur für die Datensätze der Alternativen dargestellt (nicht aufgeführt ist bspw. das Modul für die Kosten oder den Selbstschutz). Diese werden an die entsprechenden Module zur Berechnung der *Elementaren Kriterien* übergeben (siehe Abbildung 4).

Die Geometrie von Rumpf und Flächen wird in dem Modul *Geometry* abgelegt, welches anschließend zur Ableitung der Aerodynamik genutzt wird. Diese besteht im Wesentlichen aus Beiwerten für den Auftrieb und den Widerstand (auftriebsunabhängig und induziert). Zur effizienten Ableitung der Aerodynamik wurde DATCOM (McDonnell Douglas Astronautics Company 1999) verwendet, welches ein semiempi-

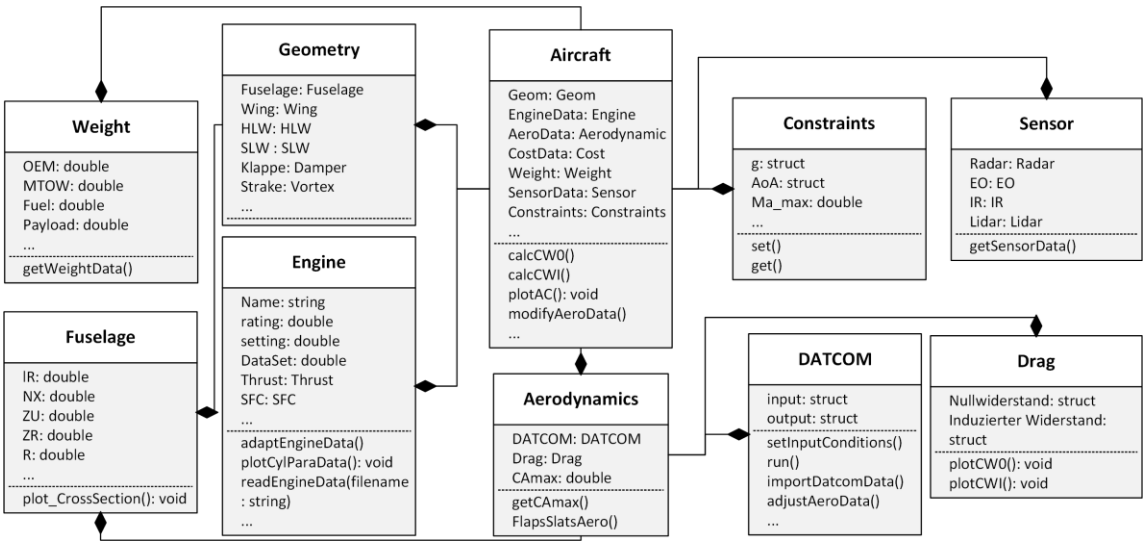


Abbildung 5: Klassendiagramm der Datensätze für die Alternativen. *Das Modell der betrachteten Alternativen besteht aus unterschiedlichen Klassen, welche den kompletten Datensatz einer Alternative verwalten. Innerhalb der einzelnen Klassen sind Methoden zur Erzeugung der jeweiligen Datensätze verfügbar (bspw. DATCOM oder Engine).*

[3] Eine zusätzliche Widerstandsfläche ergibt sich bspw. durch das Mitführen von Außenlasten wie Bewaffnung oder Missionssensorik, welche einen Beitrag zum Widerstand liefert und damit die Flugleistungen beeinflusst. Diese sind bei den Berechnungen zu berücksichtigen.

risches Verfahren zur Abschätzung der Aerodynamik eines Luftfahrzeuges darstellt. Die ermittelten Beiwerte werden im *ASCII*-Format bereitgestellt, welches mit der *Aerospace Toolbox*[4] von Matlab importiert werden kann.

6.3 Ergebnissynthese

An deren Spitze steht die Elternklasse *MCDA Method*, von welcher die einzelnen Klassen der Methoden erben. Zur einheitlichen Steuerung und Verwaltung wurden die Methoden in die Klasse *ETMethod* eingebettet, welche alle notwendigen Parameter für die MCDA- Methoden enthält. Dies sind neben den entscheidungsrelevanten Parametern aus dem *House of Metrics* die berechneten Ausprägungen der *Elementaren Kriterien* für alle Alternativen. Bei der Anwendung der MCDA- Methoden können die Ergebnisse auf den einzelnen Ebenen der Kriterienhierarchie für jedes Elternkriterium einzeln berechnet werden. Dazu werden innerhalb des *tree* Moduls die entsprechenden Einträge inklusive deren Präferenzen ermittelt und deren Ausprägungen aus dem BM importiert. Anschließend werden diese Daten von den

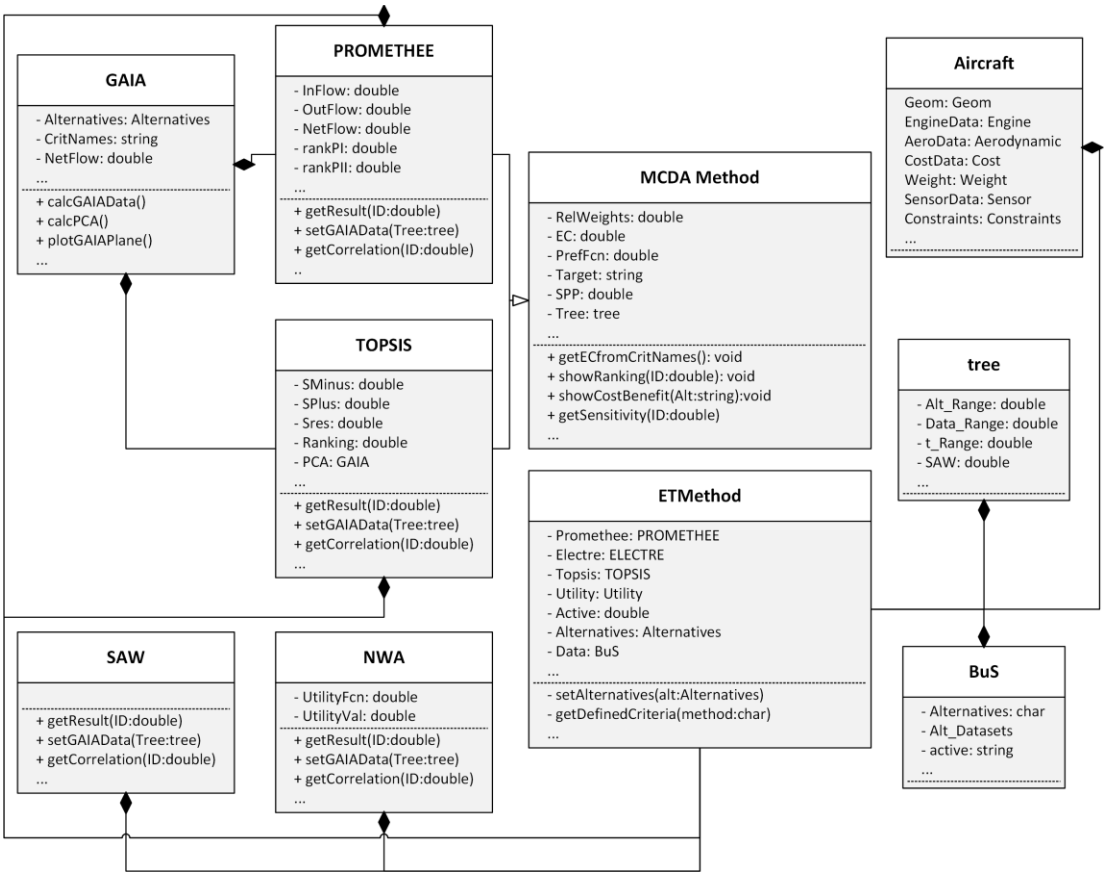


Abbildung 6: Klassendiagramm der MCDA Methoden. *Das Diagramm zeigt den Aufbau der MCDA Klassen zur Berechnung des Systempotentials und zur Analyse des Ergebnisses (Robustheit, Korrelationen).*

[4] https://de.mathworks.com/help/aerotbx/; zuletzt besucht am 02.09.2018

Berechnungsmethoden der *ETMethod* Klasse genutzt, um mit den ausgewählten Modulen (der vier MCDA Methoden) die Berechnungen der Rangfolgen durchzuführen und die Ergebnisdarstellung aufzubereiten. Eine spezielle Art der Ergebnisdarstellung kann durch die Hauptkomponentenanalyse (*Partial Component Analysis*, PCA) erreicht werden, welche über das *GAIA* Modul implementiert wurde. Diese ist in die verschiedenen Klassen der jeweiligen MCDA- Methoden eingebettet und nutzt die Ergebnisse der Berechnung zur komponentenweisen Darstellung der Zusammenhänge. Für die einzelnen Klassen wurde eine Methode namens *getSensitivity* implementiert, welche die Robustheit des Ergebnisses der einzelnen MCDA- Methoden durch Variation der Gewichtungen und der Kriterienausprägungen überprüft.

6.4 Optimizer

Die Klasse *Optimizer* nutzt die implementierten MCDA Klassen, um durch Variation der Ausprägungen die Rangfolge zu verändern. Das entsprechende Klassendiagramm ist in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigt die Klasse *Optimizer* und die Einbettung des *ETMethod* Moduls, welches wiederum die einzelnen MCDA Klassen als entsprechende Attribute enthält. Diese MCDA Klassen, deren Elternklasse *MCDA Method*, die zugehörige Datenbasis für die entscheidungsrelevanten Parameter *tree* sowie die Datenbasis für die betrachteten Alternativen sind nur qualitativ dargestellt. Dabei sind nicht alle Kompositionen des *Optimizer* Moduls aufgelistet.

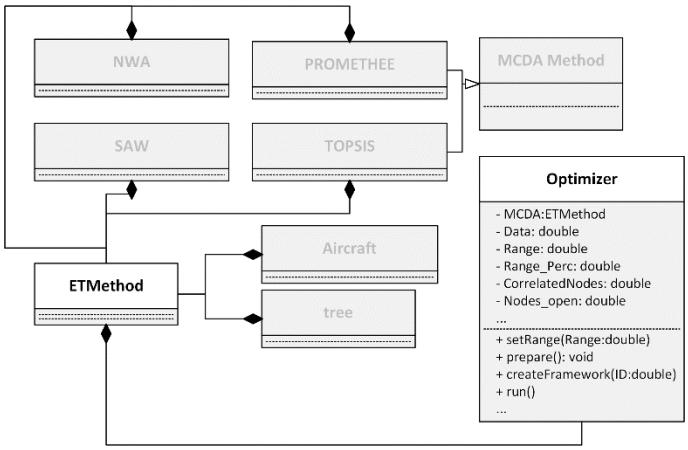


Abbildung 7: Klassendiagramm *Optimizer.* *Darstellung der Optimizer Klasse und der eingebetteten ETMethod Klasse. Die übrigen Klassen sind grau hinterlegt und nur qualitativ dargestellt.*

7. Berechnung des Systempotentials

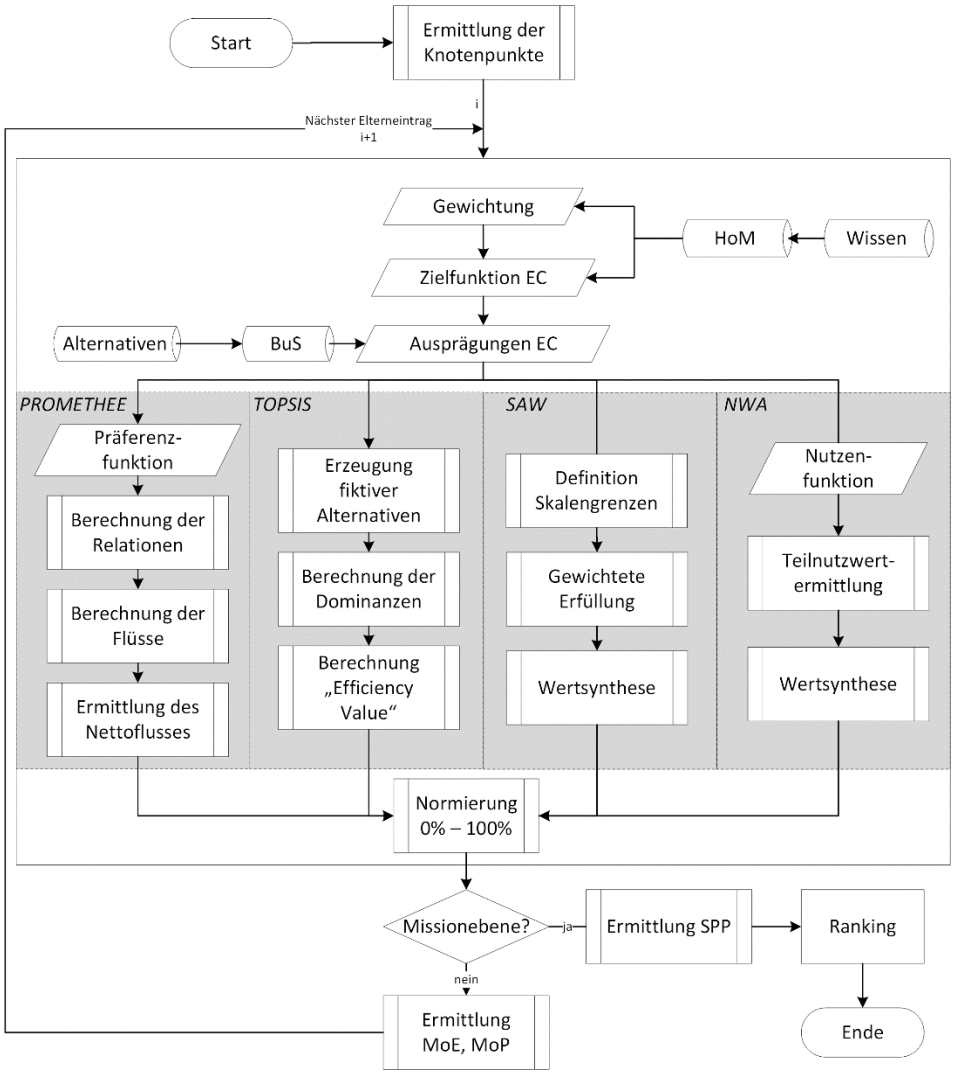
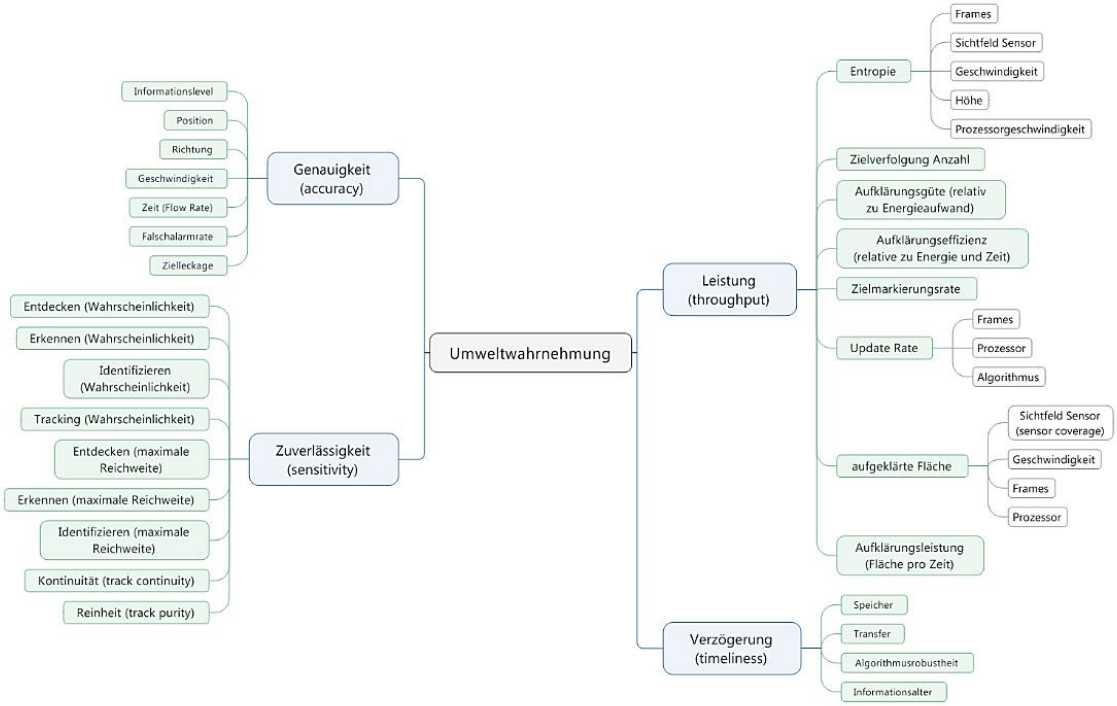


Abbildung 8: Flussdiagramm der einzelnen MCDA Methoden. *Die vier implementierten Methoden nutzen unterschiedliche Vorgehen und damit auch unterschiedliche Eingangsparameter. Zur Berücksichtigung von Wertpräferenzen sind nur die Methoden Promethee und die Nutzwertanalyse in der Lage.*

8. Kriterienstruktur *Umweltwahrnehmung*

Die Struktur für die Umweltwahrnehmung unterscheidet sich in Luft (Air), Oberfläche (Surface) und (unterhalb der Oberfläche (Undersurface). Im Folgenden wird ein Auszug aus der Struktur für die Oberfläche dargestellt.



	Kriterium	Definition
Genauigkeit	Informationslevel	Abstraktionsgrad der dargestellten Informationen (Morawietz et al. 2016)
	Position	RMS Fehler zwischen den Positionsschätzungen des Trackers und der genauen Position
	Richtung	RMS Fehler zwischen den Richtungsschätzungen des Trackers und der genauen Richtung
	Geschwindigkeit	RMS Fehler zwischen den Geschwindigkeitsschätzungen des Trackers und der genauen Geschwindigkeit
	Falschalarmrate	Anzahl der Fehldetektionen pro Quadratkilometer
	Zielleckage	Anzahl der nicht erkannten Ziele
Zuverlässigkeit	Entdecken	Wahrscheinlichkeit zum Entdecken
	Erkennen	Wahrscheinlichkeit zum Erkennen
	Identifizieren	Wahrscheinlichkeit zum Identifizieren
	Tracking	Wahrscheinlichkeit zum Entdecken beim Tracken
	Entdecken (max. Reichweite)	maximale Reichweite Detektion
	Erkennen (max. Reichweite)	maximale Reichweite Erkennen

	Identifizieren (max. Reichweite)	maximale Reichweite Identifizieren
	Kontinuität	Durchschnittliche Anzahl von Tracks, die pro Flugbahn eines einzelnen Fahrzeugs / einer Gruppe gebildet werden. Im Idealfall gleich 1. (Blasch et al. 2004)
	Reinheit	Verhältnis von Track-Segmenten in einem integrierten Track, die zu demselben Fahrzeug oder einer Gruppe von Fahrzeugen gehören, zur Gesamtzahl von Segmenten in einem Track (Blasch et al. 2004)
	Entropie	Überlappung der Bildbereiche aus aufeinanderfolgenden Frames
	Zielverfolgung Anzahl	Anzahl der gleichzeitig verfolgbaren Ziele
Leistung	Aufklärungsgüte	Aufgeklärte Fläche pro Energieeinsatz
	Aufklärungseffizienz	Aufgeklärte Fläche pro Zeit und Energieeinsatz
	Zielmarkierungsrate	Markierte Ziele pro Zeit
	Update Rate	Dauer für die Aktualisierung des Lagebildes
	Aufgeklärte Fläche	Aufgeklärte Fläche gesamt
	Aufklärungsrate	Aufgeklärte Fläche pro Zeit
	Speicherfähigkeit	Speichern der Daten an Bord der Plattform
	Transferfähigkeit	Transfer der Daten zum Boden
Verzögerung	Algorithmusrobustheit	Widerstandsfähigkeit des Algorithmus gegen äußere Störungen
	Informationsalter	Zeit zwischen Durchführung einer Aufnahme bis zum Vorliegen eines auswertbaren Bildes zur Auswertung im Bodensegment einschließlich systeminterner Übertragungs-, Verarbeitungs- und Auswertezeit.

9. Fragebögen

9.1 Bögen für Experten

Fragebogen für Experten: Personenbezogene Daten

Anonyme Angaben zur Person

Wie viel Jahre Erfahrung haben Sie im Bewerten von Luftfahrzeugen bzw. im Treffen von Auswahlentscheidungen?:_____ Jahre

Bitte markieren Sie die Systeme, welche Sie bereits bewertet haben (Mehrfachnennung möglich).

Kampfflugzeuge	Transportflugzeuge	UAV	Hubschrauber	sonstige
○	○	○	○	○

Sind Sie im militärischen oder zivilen Bereich tätig? _____

In welchem Bereich sind Sie tätig (Mehrfachnennung möglich) ?

○	○	○	○
Beschaffung	Flugzeugentwurf	Bedrohungsanalyse	Luftkampftaktik

Fragebogen für Experten: Einstellung

Bitte beantworten Sie die nachfolgend gestellten Fragen durch ankreuzen der zutreffenden Ausdrücke. Vielen Dank für Ihre Mithilfe.

Auswahlentscheidungen in der Luftfahrt (Aktuelle Entscheidungen):

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
1. Bei einer Auswahlentscheidung wird dem Entscheidungsträger (ET) eine große Verantwortung zuteil	○	○	○	○	○	○	○
2. Meine Bewertungsergebnisse haben einen großen Einfluss auf wichtige Entscheidungen	○	○	○	○	○	○	○
3. Meist sind diese Entscheidungen irreversibel	○	○	○	○	○	○	○

4. Die aktuellen Auswahlentscheidungen/Systembewertungen sind …

schwierig	○	○	○	○	○	einfach abzuleiten
Einzelleistungen	○	○	○	○	○	Teamleistungen
transparent	○	○	○	○	○	nebulös
trivial	○	○	○	○	○	anspruchsvoll
überschaubar	○	○	○	○	○	komplex

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
5. Intuitive Entscheidungen (*„Aus dem Bauch heraus“*) sind meist ausreichend	○	○	○	○	○	○	○
6. Die Komplexität der Bewertung von Luftfahrzeugen erfordert ein strukturiertes Vorgehen	○	○	○	○	○	○	○
7. Ohne ein Unterstützungssystem ist eine „richtige“ Bewertung von Luftfahrzeugen nicht durchführbar	○	○	○	○	○	○	○

Auswahlentscheidungen in der Luftfahrt (Verbesserung):

8. Die Ableitung der Auswahlentscheidungen sollten … sein

detailliert	○	○	○	○	○	grob angenähert
transparent	○	○	○	○	○	nebulös
missionsorientiert	○	○	○	○	○	allgemein
objektiv	○	○	○	○	○	subjektiv

9. Die Ergebnisse sollten … sein

schwierig	○	○	○	○	○	einfach abzuleiten
Einzelleistungen	○	○	○	○	○	Teamleistungen
detailliert	○	○	○	○	○	grob angenähert
transparent	○	○	○	○	○	nebulös

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
10. Die Ableitung von Systemanforderungen (*Requirements*) basieren meist auf Expertenaussagen	○	○	○	○	○	○	○
11. Ein objektives Verfahren zur Ableitung solcher Anforderungen ist essentiell	○	○	○	○	○	○	○

12. Die Entscheidungen bzw. Ergebnisse sollten … werden

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
Detaillierter	○	○	○	○	○	○	○
Transparenter	○	○	○	○	○	○	○
Nachvollziehbarer	○	○	○	○	○	○	○
Objektiver	○	○	○	○	○	○	○
Vertrauenswürdiger	○	○	○	○	○	○	○
Unterstützt abgeleitet	○	○	○	○	○	○	○

Auswahlentscheidungen in der Luftfahrt (Einstellung zur Unterstützung):

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
13. Ich würde keine Unterstützung nutzen und vertraue auf meine Intuition	○	○	○	○	○	○	○
14. Unterstützungssysteme haben meist keinen Praxisbezug	○	○	○	○	○	○	○
15. Erst durch Nutzung eines Unterstützungssystems zur Ableitung einer AWE vertraue ich meinen Ergebnisses	○	○	○	○	○	○	○

16. Ein entsprechendes Entscheidungsunterstützungssystem ist …

wünschenswert	○	○	○	○	○	unerwünscht
notwendig	○	○	○	○	○	optional
überfällig	○	○	○	○	○	überflüssig
nicht umsetzbar	○	○	○	○	○	realisierbar

17. Neuen Verfahren/Methodiken gegenüber bin ich eher …

skeptisch	○	○	○	○	○	offen
neugierig	○	○	○	○	○	misstrauisch
voreingenommen	○	○	○	○	○	unvoreingenommen

Fragebogen für Experten: Ableitung der Kriterienstruktur

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
18. Ich kann die Verbindung zwischen Missionen und Kriterien erkennen	○	○	○	○	○	○	○
19. Die Darstellung der Kriterienstruktur ist übersichtlich	○	○	○	○	○	○	○
20. Ich bin auf das A-Priori Wissen angewiesen	○	○	○	○	○	○	○
21. Ich vertraue dem definierten Wissen der Experten	○	○	○	○	○	○	○
22. Ich konnte die Kriterienstruktur nach meinen Wünschen anpassen	○	○	○	○	○	○	○

23. Das A-Priori Wissen ist …

nützlich	○	○	○	○	○	überflüssig
unterstützend	○	○	○	○	○	verwirrend
nachvollziehbar	○	○	○	○	○	nebulös
wertvoll	○	○	○	○	○	wertlos

24. Die Kriterienstruktur ist …

vollständig	○	○	○	○	○	unvollständig
zu komplex	○	○	○	○	○	zu einfach
vertrauenswürdig	○	○	○	○	○	fraglich

25. Die Darstellung der Kriterienstruktur ist …

übersichtlich	○	○	○	○	○	undurchsichtig
komplett	○	○	○	○	○	vereinfacht
gut	○	○	○	○	○	schlecht

Fragebogen für Experten: Definition der Präferenzen

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
26. Die Darstellung der Gewichtung ist übersichtlich	○	○	○	○	○	○	○
27. Eine detaillierte Ableitung der Gewichtung war möglich	○	○	○	○	○	○	○
28. Ich wurde bei der Ermittlung der Gewichtung gut unterstützt	○	○	○	○	○	○	○

29. Die Ableitung der Gewichtungsverteilung ist …

gut	○	○	○	○	○	schlecht umgesetzt
leicht	○	○	○	○	○	schwierig
unterstützend	○	○	○	○	○	verwirrend
nachvollziehbar	○	○	○	○	○	nebulös
methodisch	○	○	○	○	○	willkürlich

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
30. Ich konnte alle Präferenzen abbilden, welche einen Einfluss auf die Bewertung haben	○	○	○	○	○	○	○
31. Eine detaillierte Abbildung der Präferenzen war möglich	○	○	○	○	○	○	○
32. Ich wurde bei der Definition der Präferenzen gut unterstützt	○	○	○	○	○	○	○

33. Die Ableitung der Präferenzen ist …

gut	○	○	○	○	○	schlecht umgesetzt
leicht	○	○	○	○	○	schwierig
zu detailliert	○	○	○	○	○	zu einfach
genau	○	○	○	○	○	ungenau
einfach	○	○	○	○	○	schwierig

Warum war für Sie die Ableitung der Gewichtungs- und Präferenzverteilung so gut/schlecht?

Fragebogen für Experten: Datenbasis

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
34. Die Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Kriterien war in ausreichendem Maße möglich	○	○	○	○	○	○	○
35. Diese Abhängigkeiten können einfach editiert werden	○	○	○	○	○	○	○
36. Die Darstellung der Datenbasis reduziert die Komplexität	○	○	○	○	○	○	○

37. Die Datenbasis ist …

leicht	○	○	○	○	○	schwierig editierbar
übersichtlich	○	○	○	○	○	irreführend
notwendig	○	○	○	○	○	überflüssig
umfangreich	○	○	○	○	○	überschaubar
maximal vereinfacht	○	○	○	○	○	zu komplex

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
38. Die Ausprägungen der Kriterien werden objektiv ermittelt	○	○	○	○	○	○	○
39. Ich vertraue den ermittelten Ausprägungen	○	○	○	○	○	○	○
40. Die Konfigurationen können in ausreichender Detaillierung definiert werden	○	○	○	○	○	○	○
41. Die Zusammensetzung der Kosten kann transparent nachvollzogen werden	○	○	○	○	○	○	○

Fragebogen für Experten: Ergebnisse und Analyse

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
42. Die erzeugten Ergebnisse können detaillierte Fragestellungen beantworten	○	○	○	○	○	○	○
43. Die Zusammensetzung der Ergebnisse kann genau nachvollzogen werden	○	○	○	○	○	○	○
44. Stärken und Schwächen der Systeme können auf allen Ebenen dargestellt werden	○	○	○	○	○	○	○
45. Die erzeugten Ergebnisse decken eine hohe Informationstiefe ab	○	○	○	○	○	○	○
46. Ich habe ein großes Vertrauen in die Robustheit der Ergebnisse	○	○	○	○	○	○	○
47. Ich vertraue auf die Richtigkeit der Ergebnisse	○	○	○	○	○	○	○

48. Die Darstellung der Ergebnisse ist …

umfassend	○	○	○	○	○	lückenhaft
detailliert	○	○	○	○	○	oberflächlich
übersichtlich	○	○	○	○	○	irreführend
genau	○	○	○	○	○	ungenau
ergebnisorientiert	○	○	○	○	○	ausufernd
nutzlos	○	○	○	○	○	hilfreich
geeignet	○	○	○	○	○	ungeeignet

Fragebogen für Experten: Gesamtbeurteilung des Vorgehens

(absolut)

49. Das angewandte Vorgehen ist …

verständlich	○	○	○	○	○	unverständlich
nützlich	○	○	○	○	○	überflüssig
motivierend	○	○	○	○	○	abschreckend
tauglich	○	○	○	○	○	untauglich
detailliert	○	○	○	○	○	ungenau
unterstützend	○	○	○	○	○	hemmend
transparent	○	○	○	○	○	nebulös
fehlerfrei	○	○	○	○	○	fehlerbehaftet
missionsorientiert	○	○	○	○	○	generisch
konsistent	○	○	○	○	○	inkonsistent
plausibel	○	○	○	○	○	unverständlich
objektiv	○	○	○	○	○	subjektiv
brauchbar	○	○	○	○	○	nicht brauchbar

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
50. Das Vorgehen ist maximal objektiv	○	○	○	○	○	○	○
51. Ich habe dem Vorgehen vertraut	○	○	○	○	○	○	○
52. Ich würde das Vorgehen für zukünftige Analysen nutzen	○	○	○	○	○	○	○
53. Ich finde das Vorgehen und das Werkzeug unnötig komplex	○	○	○	○	○	○	○
54. Das Vorgehen ist zur Bewertung von Lfz hervorragend geeignet	○	○	○	○	○	○	○
55. Der Bewertungsprozess ist maximal transparent	○	○	○	○	○	○	○
56. Die Methodik kann für eine ganzheitliche Systembewertung nicht einfacher gestaltet werden	○	○	○	○	○	○	○
57. Ich sehe ein erhebliches Potential in diesem Vorgehen (auch für andere AWE)	○	○	○	○	○	○	○

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft überhaupt **nicht** zu	kA
58. Ich habe notwendige Funktionen vermisst	○	○	○	○	○	○	○
Wenn ja, Welche?	_____						
59. Ich habe mich bei der Nutzung der Software sehr sicher gefühlt und dieser vertraut	○	○	○	○	○	○	○
60. Die Grafische Oberfläche war sehr benutzerfreundlich	○	○	○	○	○	○	○

Nur DESFACE

61. Die Software schätze ich … ein.

schwierig	○	○	○	○	○	einfach zu bedienen
hilfreich	○	○	○	○	○	überflüssig
gut	○	○	○	○	○	schlecht umgesetzt
unterstützend	○	○	○	○	○	hemmend
empfehlenswert	○	○	○	○	○	abratend

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
62. Das Vorgehen ist für das *Requirments Engineering* einsetzbar	○	○	○	○	○	○	○
63. Mit dem Vorgehen können sehr effizient belastbare Anforderungen an Lfz abgeleitet werden	○	○	○	○	○	○	○

64. Die Optimierung der Leistungsparameter für das *Requirments Engineering* bewerte ich als …

sinnvoll	○	○	○	○	○	sinnlos
hilfreich	○	○	○	○	○	überflüssig
gut	○	○	○	○	○	schlecht umgesetzt
empfehlenswert	○	○	○	○	○	abratend in der Nutzung

Fragebogen für Experten: Bewertung des Aufwandes

Bitte beurteilen Sie die angewandte Methodik anhand der folgenden Gesichtspunkte und Begriffspaare. Kreuzen Sie dabei bitte jeweils nur ein Feld an.

75. Der Aufwand war …

niedrig	○	○	○	○	○	hoch
gerechtfertigt	○	○	○	○	○	übermäßig
nicht abschreckend	○	○	○	○	○	abschreckend

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
76. Der Aufwand ist für die erreichte Steigerung der Ergebnisgenauigkeit viel zu hoch	○	○	○	○	○	○	○
77. Der Aufwand für eine ganzheitliche Systembewertung kann nicht weiter reduziert werden	○	○	○	○	○	○	○
78. Die Ergebnisgenauigkeit kann mit einem geringeren Aufwand ebenfalls erreicht werden	○	○	○	○	○	○	○
79. Der hohe Aufwand ist in Relation zu dem erzielten Nutzen gerechtfertigt	○	○	○	○	○	○	○

80. Bitte geben Sie ein Verhältnis von Nutzen/Aufwand an:

Nutzen: _____

Aufwand: _____

Fragebogen für Experten: Gesamtbeurteilung des Vorgehens

(relativ)

	Trifft **voll** zu	Trifft **überwiegend** zu	Trifft **teilweise** zu	Trifft **selten** zu	Trifft **sehr selten** zu	Trifft **überhaupt nicht** zu	kA
65. Ich habe ein größeres Vertrauen in die Ergebnisse des DSS	○	○	○	○	○	○	○
66. Die Zusammensetzung der Ergebnisse ist nachvollziehbarer	○	○	○	○	○	○	○
67. Mit dem DSS können detailliertere Fragestellungen beantwortet werden	○	○	○	○	○	○	○
68. Ich würde das DSS dem Referenzvorgehen für meine Arbeit bevorzugen	○	○	○	○	○	○	○
69. Das DSS bietet viel mehr Möglichkeiten zur Berücksichtigung wichtiger Parameter	○	○	○	○	○	○	○
70. Ich habe dem Vorgehen und speziell den Ergebnissen mehr vertraut	○	○	○	○	○	○	○
71. Im Vergleich zu dem Referenzvorgehen würde ich das DSS bevorzugen	○	○	○	○	○	○	○
72. Der Bewertungsprozess ist transparenter geworden	○	○	○	○	○	○	○

73. Die Ergebnisse des DSS sind im Vergleich zum denen des Referenzvorgehens …

ungenauer	○	○	○	○	○	genauer
unklarer	○	○	○	○	○	nachvollziehbarer
transparenter	○	○	○	○	○	nebulöser
objektiver	○	○	○	○	○	subjektiver
robuster	○	○	○	○	○	sensibler
tiefgründiger	○	○	○	○	○	oberflächlicher
vertrauenswürdiger	○	○	○	○	○	zweifelhafter

74. Die Methodik des DSS war …

verständlicher	○	○	○	○	○	unverständlicher
nützlicher	○	○	○	○	○	überflüssiger
motivierender	○	○	○	○	○	abschreckender

9.2 Auswertung

		Referenz							*DESFACE*										
		Trifft **voll** zu (3)	Trifft **überwiegend** zu (2)	Trifft **teilweise** zu (1)	Trifft **selten** zu (-1)	Trifft **sehr selten** zu (-2)	Trifft **überhaupt nicht** zu (-3)	Ø	Trifft **voll** zu (3)	Trifft **überwiegend** zu (2)	Trifft **teilweise** zu (1)	Trifft **selten** zu (-1)	Trifft **sehr selten** zu (-2)	Trifft **überhaupt nicht** zu (-3)	Ø			%	AV
Angaben zum bisherigen Vorgehen	(1) Bei einer Auswahlentscheidung wird dem Entscheidungsträger (ET) eine große Verantwortung zuteil	4	3	1				**2,37**										79,1	
	(2) Meine Bewertungsergebnisse haben einen großen Einfluss auf wichtige Entscheidungen	1	3	2	2			**1,12**										37,5	
	(3) Meist sind diese Entscheidungen irreversibel	2	3	2	1			**0,75**										25	
	(4) Die aktuellen Auswahlentscheidungen/Systembewertungen sind …	3	3	2				**1,12**								schwierig	einfach abzuleiten	56,2	
		1	3		2	2		**-0,12**								Einzelleistungen	Teamleistungen	-6,2	
				5	2	1		**-0,5**								transparent	nebulös	-25	
					4	4		**-1,5**								trivial	anspruchsvoll	-75	
				1	4	3		**-1,25**								überschaubar	komplex	-62,5	
	(5) Intuitive Entscheidungen (*„Aus dem Bauch heraus“*) sind meist ausreichend			1	3	2	2	**-1,5**										-50	

	(6) Die Komplexität der Bewertung von Luftfahrzeugen erfordert ein strukturiertes Vorgehen	5	3					**2,62**						87,5
	(7) Ohne ein Unterstützungssystem ist eine „richtige“ Bewertung von Luftfahrzeugen nicht durchführbar	1	4	3				**1,75**						58,3
	(8) Die Ableitung der Auswahlentscheidungen sollten … sein	4	4					**1,5**				detailliert	grob angenähert	75
		4	4					**1,5**				transparent	nebulös	75
		3	4	1				**1,25**				missionsorientiert	allgemein	62,5
		7	1					**1,87**				objektiv	subjektiv	93,7
	(9) Die Ergebnisse sollten … sein		1	1	4	2		**-0,87**				schwierig	einfach abzuleiten	-43,7
				3	1	4		**-1,12**				Einzelleistungen	Teamleistungen	-56,2
		2	4	1	1			**0,87**				detailliert	grob angenähert	43,7
		4	4					**1,5**				transparent	nebulös	75
	(10) Die Ableitung von Systemanforderungen (*Requirements*) basieren meist auf Expertenaussagen	1	3	4				**1,62**						54,2
	(11) Ein objektives Verfahren zur Ableitung solcher Anforderungen ist essentiell	5	3					**2,62**						87,5
	(12) Die Entscheidungen bzw. Ergebnisse sollten … werden													0
	Detaillierter	3	4	1				**2,25**						75
	Transparenter	5	2	1				**2,5**						83,3
	Nachvollziehbarer	3	4	1				**2,25**						75
	Objektiver	6	2					**2,75**						91,6
	Vertrauenswürdiger	3	4	1				**2,25**						75
	Unterstützt abgeleitet	4	2	2				**2,25**						75
	(13) Ich würde keine Unterstützung nutzen und vertraue auf meine Intuition			1		5	2	**-1,87**						-62,5
	(14) Unterstützungssysteme haben meist keinen Praxisbezug			1	2	4	1	**-1,5**						-50

	(15) Erst durch Nutzung eines Unterstützungs-systems zur Ableitung einer AWE vertraue ich meinen Ergebnisses		3	1	3	1										0	
	(16) Ein entsprechendes Entscheidungsunterstützungssystem ist …	6	1	1				**1,62**						wünschens-wert	uner-wünscht	81,2	
		4	2	2				**1,25**						notwendig	optional	62,5	
		5	2	1				**1,5**						überfällig	überflüssig	75	
			2	3	2	1		**-0,25**						nicht um-setzbar	realisierbar	-12,5	
	(17) Neuen Verfahren/Methodiken gegenüber bin ich eher …		1		2	5		**-1,37**						skeptisch	offen	-68,7	
		2	1		5			**0**						misstrauisch	neugierig	0	
				2	4	2		**-1**						voreinge-nommen	unvorein-genommen	-50	
		Referenz							***DESFACE***								
Ableitung der Kriterien	(18) Ich kann die Verbindung zwischen Missionen und Kriterien erkennen	2	2	3	1			**1,5**	5	3			**2,62**			50	Nach-vollzieh-barkeit Vertrau-ensgrad
	(19) Die Darstellung der Kriterienstruktur ist übersichtlich	1	4	2	1			**1,5**	4	3	1		**2,37**			50	Nach-vollzieh-barkeit
	(20) Ich bin auf das A-Priori Wissen angewiesen	2	5	1				**2,12**	1	5	2		**1,87**			70,8	Nach-vollzieh-barkeit Anwend-barkeit
	(21) Ich vertraue dem definierten Wissen der Experten		3	2	3			**0,62**		8			**2**			20,8	Vertrau-ensgrad
	(22) Ich konnte die Kriterienstruktur nach meinen Wünschen anpassen	2	5	1				**2,12**	6	2			**2,75**			70,8	Anwend-barkeit
	(23) Das A-Priori Wissen ist …	3	5					**1,37**	6	2			**1,75**	nützlich	überflüssig	68,7	Anwend-barkeit
		1	7					**1,12**	5	3			**1,62**	unterstüt-zend	verwirrend	56,2	Vertrau-ensgrad
		1	3	1	3			**0,25**	3	4	1		**1,25**	nachvoll-ziehbar	nebulös	12,5	Nach-vollzieh-barkeit
		2	5	1				**1,12**	5	3			**1,62**	wertvoll	wertlos	56,2	

	(24) Die Kriterienstruktur ist …		4	2	2			**0,25**	1	6	1			**1**	vollständig	unvollständig	12,5	Detaillierung
		1		4	3			**-0,12**		4	4			**0,5**	zu komplex	zu einfach	-6,2	Nachvollziehbarkeit
		2	2	1	3			**0,37**	2	5	1			**1,12**	vertrauenswürdig	fraglich	18,7	Vertrauensgrad
	(25) Die Darstellung der Kriterienstruktur ist …	2	1	2	3			**0,25**	4	3	1			**1,37**	übersichtlich	undurchsichtig	12,5	Nachvollziehbarkeit
			2	4	2			**0**	3	3	2			**1,12**	komplett	vereinfacht	0	Detaillierung
		1	1	4	2			**0,12**	4	4				**1,5**	gut	schlecht	6,25	Anwendbarkeit
Datenbasis	(26) Die Darstellung der Gewichtung ist übersichtlich		1	4	3			**0,37**	2	6				**2,25**			12,5	Nachvollziehbarkeit Anwendbarkeit
	(27) Eine genauere Ableitung der Gewichtung war möglich			4	3	1		**-0,12**	4	3	1			**2,37**			-4,2	Detaillierung
	(28) Ich wurde bei der Ermittlung der Gewichtung gut unterstützt			3	3	1	1	**-0,62**	4	4				**2,5**			-20,8	Anwendbarkeit
	(29) Die Ableitung der Gewichtungsverteilung ist …		1	5	2			**-0,12**	5	3				**1,62**	gut	schlecht umgesetzt	-6,2	Anwendbarkeit
			1	4	3			**-0,25**	2	4	2			**1**	leicht	schwierig	-12,5	Anwendbarkeit
			2	5	1			**0,12**	3	5				**1,37**	unterstützend	verwirrend	6,2	Vertrauensgrad
			2	3	3			**-0,12**	2	5	1			**1,12**	nachvollziehbar	nebulös	-6,2	Nachvollziehbarkeit
				4	3	1		**-0,62**	7	1				**1,87**	methodisch	willkürlich	-31,2	Nachvollziehbarkeit
	(30) Ich konnte alle Präferenzen abbilden, welche einen Einfluss auf die Bewertung haben			4	3		1	**-0,25**	3	5				**2,37**			-8,3	Vertrauensgrad
	(31) Eine detaillierte Abbildung der Präferenzen war möglich		3	2	2	1		**0,5**	4	3	1			**2,37**			16,6	Detaillierung
	(32) Ich wurde bei der Definition der Präferenzen gut unterstützt		2	3		2	1	**0**	3	4	1			**2,25**			0	Anwendbarkeit

	(33) Die Ableitung der Präferenzen ist …		2	3	2	1		**-0,25**	4	4				**1,5**	gut	schlecht umgesetzt	-12,5	Anwendbarkeit
			2	3	2	1		**-0,25**	1	4	2			**0,85**	leicht	schwierig	-12,5	Anwendbarkeit
				4	3	1		**-0,62**		2	6			**0,25**	zu detailliert	zu einfach	-31,2	Detaillierung
				4	3	1		**-0,62**	2	6				**1,25**	genau	ungenau	-31,2	Vertrauensgrad
			1	3	3	1		**-0,5**	2	5	1			**1,12**	einfach	schwierig	-25	
Bewertung der Nützlichkeit	(34) Die Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Kriterien war in ausreichendem Maße möglich			1	2	2	3	**-1,75**	4	4				**2,5**			-58,3	Transparenz Vertrauensgrad
	(35) Diese Abhängigkeiten können einfach editiert werden			1	2	1	4	**-1,87**	2	4	2			**2**			-62,5	Anwendbarkeit
	(36) Die Darstellung der Datenbasis reduziert die Komplexität		1	2	2	3		**-0,5**	1	4	3			**1,75**			-16,6	Nachvollziehbarkeit Vertrauensgrad
	(37) Die Datenbasis ist …		1	5	2			**-0,12**	2	5	1			**1,12**	leicht editierbar	schwierig editierbar	-6,2	Anwendbarkeit
			2	4	2			**0**	3	3	2			**1,12**	übersichtlich	irreführend	0	Nachvollziehbarkeit
		2	4	2				**1**	4	4				**1,5**	notwendig	überflüssig	50	Vertrauensgrad
			1	6	1			**0**	5	3				**1,62**	umfangreich	überschaubar	0	Detaillierung
			4	3	1			**0,37**		4	4			**0,5**	maximal vereinfacht	zu komplex	18,7	Nachvollziehbarkeit
	(38) Die Ausprägungen der Kriterien werden objektiv ermittelt		2	1	2	2	1	**-0,5**	2	4	2			**2**			-16,6	Detaillierung Vertrauensgrad
	(39) Ich vertraue den ermittelten Ausprägungen			4	1	1	2	**-0,62**	3	4	1			**2,25**			-20,8	Vertrauensgrad
	(40) Die Konfigurationen können in ausreichender Detaillierung definiert werden			2	3	1	2	**-1,12**	5	3				**2,62**			-37,5	Detaillierung

	(41) Die Zusammensetzung der Kosten kann transparent nachvollzogen werden				4	1	3	**-1,87**	1	4	3			**1,75**			-62,5	Nachvollziehbarkeit
Ergebnisse und Analyse	(42) Die erzeugten Ergebnisse können detaillierte Fragestellungen beantworten			2	1	3	2	**-1,37**	5	3				**2,62**			-45,8	Detaillierung
	(43) Die Zusammensetzung der Ergebnisse kann genau nachvollzogen werden		1	2	2	1	2	**-0,75**	4	2	2			**2,25**			-25	Nachvollziehbarkeit Transparenz
	(44) Stärken und Schwächen der Systeme können auf allen Ebenen dargestellt werden			2	1	3	2	**-1,37**	3	3	2			**2,12**			-45,8	Transparenz
	(45) Die erzeugten Ergebnisse decken eine hohe Informationstiefe ab			1	3	2	2	**-1,5**	7	1				**2,87**			-50	Transparenz Detaillierung
	(46) Ich habe ein großes Vertrauen in die Robustheit der Ergebnisse			2	2	2	2	**-1,25**	3	3	2			**2,12**			-41,6	Transparenz Vertrauensgrad
	(47) Ich vertraue auf die Richtigkeit der Ergebnisse		1	3		2	2	**-0,62**	4	3	1			**2,37**			-20,8	Transparenz Vertrauensgrad
	(48) Die Darstellung der Ergebnisse ist …			3	2	3		**-1**	4	4				**1,5**	umfassend	lückenhaft	-50	Transparenz
				1	5	2		**-1,12**	6	2				**1,75**	detailliert	oberflächlich	-56,2	Detaillierung
		3		2	2	1		**0,25**	3	4	1			**1,25**	übersichtlich	irreführend	12,5	Transparenz
			2	2	3	1		**-0,37**	4	4				**1,5**	genau	ungenau	-18,7	Detaillierung
		1	3	3	1			**0,5**	3	5				**1,37**	ergebnisorientiert	ausufernd	25	Detaillierung
		1	3	1	3			**0,25**			1	3	4	**-1,37**	nutzlos	hilfreich	12,5	Anwendbarkeit
				3	4	1		**-0,75**	4	2	2			**1,25**	geeignet	ungeeignet	-37,5	Vertrauensgrad

Gesamtbeurteilung des Vorgehens (absolut)	(49) Das angewandte Vorgehen ist …	3	5					**1,37**	3	5					**1,37**	verständlich	unver-ständlich	68,7	Nach-vollzieh-barkeit
			5	1	2			**0,37**	4	4					**1,5**	nützlich	überflüssig	18,7	Anwend-barkeit
			1	4	2	1		**-0,37**	1	4	3				**0,75**	motivierend	abschre-ckend	-18,7	Anwend-barkeit
			2	4	2			**0**	3	5					**1,37**	tauglich	untauglich	0	Anwend-barkeit
			2	3	1	2		**-0,37**	5	3					**1,62**	detailliert	ungenau	-18,7	Detaillie-rung
			4	3	1			**0,37**	4	4					**1,5**	unterstüt-zend	hemmend	18,7	
			1	3	3	1		**-0,5**	4	4					**1,5**	transparent	nebulös	-25	Transpa-renz
				5	2	1		**-0,5**	1	3	4				**0,62**	fehlerfrei	fehlerbe-haftet	-25	Vertrau-ensgrad
			4	3	1			**0,37**	3	5					**1,37**	missionsori-entiert	generisch	18,7	Vertrau-ensgrad
			4	2	2			**0,25**	3	4	1				**1,25**	konsistent	inkonsis-tent	12,5	Vertrau-ensgrad
			4	2	3			**0,11**	3	5					**1,37**	plausibel	unver-ständlich	5,5	Transpa-renz
			2	4	1	1		**-0,12**	4	4					**1,5**	objektiv	subjektiv	-6,25	Vertrau-ensgrad
			2	1	4	1		**-0,5**	5	2	1				**1,5**	brauchbar	nicht brauchbar	-25	Anwend-barkeit
	(50) Das Vorgehen ist maximal objektiv		1	2	2	2	1	**-0,62**	2	4	2				**2**			-20,8	Vertrau-ensgrad
	(51) Ich habe dem Vorgehen vertraut		1	3	2	2		**-0,12**	4	3	1				**2,37**			-4,2	Vertrau-ensgrad
	(52) Ich würde das Vorgehen für zukünftige Analysen/ Bewertun-gen nutzen		1	2	2	1	2	**-0,75**	4	2	1	1			**2**			-25	Anwend-barkeit
	(53) Ich finde das Vorgehen und das Werkzeug unnötig komplex		2	3	1	1	1	**-0,12**			1	5	2	1	**1,22**			-4,2	Vertrau-ensgrad Anwend-barkeit
	(54) Das Vorgehen ist zur Be-wertung von Lfz gut geeignet			3	1	2	2	**-1**	2	4	2				**2**			-33,3	Vertrau-ensgrad Anwend-barkeit

	(55) Der Bewertungsprozess ist maximal transparent			1	4	1	2	**-1,37**	2	5	1				**2,12**			-45,8	Nach-vollzieh-barkeit Transpa-renz
	(56) Die Methodik kann nicht einfacher gestaltet werden			1	4	3		**-1,12**	1	4	2	1			**1,5**			-37,5	Aufwand
	(57) Ich sehe ein erhebliches Potential in diesem Vorgehen (auch für andere AWE)		1	3	2	2		**-0,12**	4	3	1				**2,37**			-4,2	Anwend-barkeit
	(58) Ich habe notwendige Funktionen vermisst	1	1		4	1	1	**0,5**				2	5	1	**1,87**			16,7	Anwend-barkeit
	(59) Ich habe mich bei der Anwendung sehr sicher gefühlt und dieser vertraut		1	4	2	1		**0,25**	2	4	2				**2**			8,3	Detaillie-rung Vertrau-ensgrad Anwend-barkeit
	(60) Die Grafische Oberfläche war sehr benutzerfreundlich		1	4	2	1		**0,25**	3	4	1				**2,25**			8,3	Anwend-barkeit
	(61) Die Software schätze ich … ein.									2	1	5			**-0,37**	schwierig	einfach zu bedienen		Anwend-barkeit
									2	4	1				**1,14**	hilfreich	überflüssig		Anwend-barkeit
									5	3					**1,62**	gut	schlecht umgesetzt		Anwend-barkeit
									3	4	1				**1,25**	unterstüt-zend	hemmend		Anwend-barkeit
									3	5					**1,37**	empfehlens-wert	abratend		Anwend-barkeit
	(62) Das Vorgehen ist für das *Requirments Engineering* einsetzbar								4	2	2				**2,25**				Anwend-barkeit
	(63) Mit dem Vorgehen können sehr effizient belastbare Anforderungen an Lfz abgeleitet werden								2	5	1				**2,12**				Detaillie-rung Vertrau-ensgrad
	(64) Die Optimierung der Leistungsparameter für das *Requirments Engineering* bewerte ich als …								3	5					**1,37**	sinnvoll	sinnlos		Anwend-barkeit
									3	4	1				**1,25**	hilfreich	überflüssig		Anwend-barkeit

					3	5		**1,62**				3	5		**-1,62**	zweifelhafter	vertrauenswürdiger		Transparenz
	(74) Die Methodik des DSS war…			2	5	1		**0,87**			2	5	1		**-0,87**	unverständlicher	verständlicher		Vertrauensgrad
					4	4		**1,5**				4	4		**-1,5**	überflüssiger	nützlicher		Anwendbarkeit
					4	4		**1,5**				4	4		**-1,5**	abschreckender	motivierender		Anwendbarkeit
Bewertung des Aufwandes	(75) Der Aufwand war…	1	2	2	2			**0,28**		2	3	2	1		**-0,25**	niedrig	hoch	14,2	Aufwand
		2	1	3	1			**0,57**	2	4	2				**1**	gerechtfertigt	übermäßig	28,5	Aufwand
		2	1	3	1			**0,57**	2	2	3	1			**0,62**	nicht abschreckend	abschreckend	28,5	Anwendbarkeit
	(76) Der Aufwand ist für die erreichte Steigerung der Ergebnisgenauigkeit viel zu hoch		1	4	1		1	**-0,28**				4	2	2	**1,75**			-9,5	Aufwand
	(77) Der Aufwand für eine ganzheitliche Systembewertung kann nicht weiter reduziert werden		1	2	2	2		**-0,28**	3	1		3	1		**0,75**			-9,5	Detaillierung
	(78) Die Ergebnisgenauigkeit kann mit einem geringeren Aufwand ebenfalls erreicht werden			3	1	2	1	**0,71**			1	1	3	3	**1,87**			23,8	Aufwand
	(79) Der Aufwand ist in Relation zu dem erzielten Nutzen gerechtfertigt	1		3		2	1	**-0,14**	3	3	2				**2,12**			-4,7	Aufwand
	(80) Bitte geben Sie ein Verhältnis von Nutzen/Aufwand an 1:	3	4	2	2	5	2,3		0,3	1	0,5	1	1	1,5					
		0,33	0,25	0,5	0,5	0,2	0,4		3,3	1	2	1	1	0,6					

10. Literaturverzeichnis

Abrahams, Alan S.; Ragsdale, Cliff T. (2012): A decision support system for patient scheduling in travel vaccine administration. In: *Decision Support Systems* 54 (1), S. 215–225. DOI: 10.1016/j.dss.2012.05.007.

Achabal, Dale D.; McIntyre, Shelby H.; Smith, Stephen A.; Kalyanam, Kirthi (2000): A decision support system for vendor managed inventory. In: *Journal of Retailing* 76 (4), S. 430–454. DOI: 10.1016/S0022-4359(00)00037-3.

Afgan, Naim; Begic, Fajik; Kazagic, Anes (2007): Multi-criteria sustainability assessment. A tool for evaluation of new energy system. In: *Therm. sci.* 11 (3), S. 43–53. DOI: 10.2298/TSCI0703043A.

Afgan, Nain H.; Carvalho, Maria G. (2008): Sustainability assessment of a hybrid energy system. In: *Energy Policy* 36 (8), S. 2903–2910. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.03.040.

Akdag, Herman; Kalaycı, Turgay; Karagöz, Suat; Zülfikar, Haluk; Giz, Deniz (2014): The evaluation of hospital service quality by fuzzy MCDM. In: *Applied Soft Computing* 23, S. 239–248. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.06.033.

Alanne, Kari; Salo, Ahti; Saari, Arto; Gustafsson, Stig-Inge (2007): Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. In: *Energy and Buildings* 39 (12), S. 1218–1226. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.01.009.

Albadvi, Amir; Chaharsooghi, S. Kamal; Esfahanipour, Akbar (2007): Decision making in stock trading. An application of PROMETHEE. In: *European Journal of Operational Research* 177 (2), S. 673–683. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.11.022.

Amaral, Thiago M.; Costa, Ana P.C. (2014): Improving decision-making and management of hospital resources. An application of the PROMETHEE II method in an Emergency Department. In: *Operations Research for Health Care* 3 (1), S. 1–6. DOI: 10.1016/j.orhc.2013.10.002.

Amiri, Morteza Pakdin (2010): Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. In: *Expert Systems with Applications* 37 (9), S. 6218–6224. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.02.103.

Anand, G.; Kodali, Rambabu (2008): Selection of lean manufacturing systems using the PROMETHEE. In: *Jnl of Modelling in Management* 3 (1), S. 40–70. DOI: 10.1108/17465660810860372.

Andres, Beatriz; Poler, Raul (2016): A decision support system for the collaborative selection of strategies in enterprise networks. In: *Decision Support Systems* 91, S. 113–123. DOI: 10.1016/j.dss.2016.08.005.

Anton, Jose M.; Grau, Juan B.; Tarquis, Ana M.; Sanchez, Diana C. (2006): MCDM Methods for Territorial Services Planning in an Andine Rural Area. In: World Automation Congress, 2006. WAC '06 ; 24 - 26 July 2006, Budapest, Hungary. 2006 World Automation Congress. Budapest, Hungary. World Automation Congress; WAC. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–6.

Aragonés-Beltrán, Pablo; Chaparro-González, Fidel; Pastor-Ferrando, Juan-Pascual; Pla-Rubio, Andrea (2014): An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects. In: *Energy* 66, S. 222–238. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.016.

Araz, Ceyhun; Mizrak Ozfirat, Pinar; Ozkarahan, Irem (2007): An integrated multicriteria decision-making methodology for outsourcing management. In: *Computers & Operations Research* 34 (12), S. 3738–3756. DOI: 10.1016/j.cor.2006.01.014.

Arnette, A.; Zobel, C.; Bosch, D.; Pease, J.; Metcalfe, T. (2010): Stakeholder ranking of watershed goals with the vector analytic hierarchy process. Effects of participant grouping scenarios. In: *Environmental Modelling & Software* 25 (11), S. 1459–1469. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.10.009.

Ashour, Omar M.; Okudan, Gul E. (2010): Fuzzy AHP and utility theory based patient sorting in emergency departments. In: *IJCENT* 1 (3/4), S. 332. DOI: 10.1504/IJCENT.2010.038357.

Awasthi, Anjali; Chauhan, Satyaveer S.; Omrani, Hichem (2011): Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. In: *Expert Systems with Applications* 38 (10), S. 12270–12280. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.04.005.

Aydogan, Emel Kızılkaya (2011): Performance measurement model for Turkish aviation firms using the rough-AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. In: *Expert Systems with Applications* 38 (4), S. 3992–3998. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.09.060.

Backhaus, Klaus (2010): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 13. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).

Balasubramaniam, Anopama; Boyle, Alexander Rohan; Voulvoulis, Nikolaos (2007): Improving petroleum contaminated land remediation decision-making through the MCA weighting process. In: *Chemosphere* 66 (5), S. 791–798. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.039.

Ballestero, Enrique; Garcia-Bernabeu, Ana (2015): Compromise Programming and Utility Functions. In: Enrique Ballestero (Hg.): Socially Responsible Investment. A Multi-Criteria Decision Making Approach, Bd. 219. Cham [u.a.]: Springer (International Series in Operations Research Management Science, 219), S. 155–175.

Bana e Costa, Carlos A.; Antão da Silva, Paula; Nunes Correia, Francisco (2004): Multicriteria Evaluation of Flood Control Measures. The Case of Ribeira do Livramento. In: *Water Resour Manage* 18 (3), S. 263–283. DOI: 10.1023/B:WARM.0000043163.19531.6a.

Bana e Costa, Carlos A.; Carlos A. (2012): MACBETH. In: *Int. J. Info. Tech. Dec. Mak.* 11 (02), S. 359–387. DOI: 10.1142/S0219622012400068.

Bao, Qiong; Ruan, Da; Shen, Yongjun; Hermans, Elke; Janssens, Davy (2012): Improved hierarchical fuzzy TOPSIS for road safety performance evaluation. In: *Knowledge-Based Systems* 32, S. 84–90. DOI: 10.1016/j.knosys.2011.08.014.

Baourakis, George; Doumpos, Michael; Kalogeras, Nikos; Zopounidis, Constantin (2002): Multicriteria analysis and assessment of financial viability of agribusinesses. The case of marketing co-operatives and juice-producing companies. In: *Agribusiness* 18 (4), S. 543–558. DOI: 10.1002/agr.10031.

Basu, Preetam; Nair, Suresh K. (2014): A decision support system for mean–variance analysis in multi-period inventory control. In: *Decision Support Systems* 57, S. 285–295. DOI: 10.1016/j.dss.2013.09.012.

Bechmann, Arnim (1978): Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung. Bern, Stuttgart: P. Haupt (Beiträge zur Wirtschaftspolitik, Bd. 29).

Bello-Dambatta, A.; Farmani, R.; Javadi, A. A.; Evans, B. M. (2009): The Analytical Hierarchy Process for contaminated land management. In: *Advanced Engineering Informatics* 23 (4), S. 433–441. DOI: 10.1016/j.aei.2009.06.006.

Belton, Valerie (1999): Multi-Criteria Problem Structuring and Analysis in a Value Theory Framework. In: Tomas Gal, Theodor J. Stewart und Thomas Hanne (Hg.): Multicriteria Decision Making. Advances in MCDM Models, Algorithms, Theory, and Applications, Bd. 21. Boston, MA: Springer US (International Series in Operations Research & Management Science, 21), S. 335–366.

Beraldi, P.; Violi, A.; Simone, F. de (2011): A decision support system for strategic asset allocation. In: *Decision Support Systems* 51 (3), S. 549–561. DOI: 10.1016/j.dss.2011.02.017.

Bergey, Paul K.; Ragsdale, Cliff T.; Hoskote, Mangesh (2003): A decision support system for the electrical power districting problem. In: *Decision Support Systems* 36 (1), S. 1–17. DOI: 10.1016/S1344-6223(02)00033-0.

Beynon, M.; Wells, P. (2008): The lean improvement of the chemical emissions of motor vehicles based on preference ranking. A PROMETHEE uncertainty analysis☆. In: *Omega* 36 (3), S. 384–394. DOI: 10.1016/j.omega.2006.04.015.

Bilbao-Terol, Amelia; Arenas-Parra, Mar; Cañal-Fernández, Verónica; Antomil-Ibias, José (2014): Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds. In: *Omega* 49, S. 1–17. DOI: 10.1016/j.omega.2014.04.005.

Bindoff, I. K.; Tenni, P. C.; Peterson, G. M.; Kang, B. H.; Jackson, S. L. (2007): Development of an intelligent decision support system for medication review. In: *Journal of clinical pharmacy and therapeutics* 32 (1), S. 81–88. DOI: 10.1111/j.1365-2710.2007.00801.x.

Blasch, Erik P.; Pribilski, Mike; Daughtery, Bryan; Roscoe, Brian; Gunsett, Josh (2004): Fusion Metrics for Dynamic Situation Analysis. In: *Proceedings of the SPIE* (5429), S. 428–438. DOI: 10.1117/12.542902.

Bochtis, Dionysis D.; Sørensen, Claus G.; Green, Ole (2012): A DSS for planning of soil-sensitive field operations. In: *Decision Support Systems* 53 (1), S. 66–75. DOI: 10.1016/j.dss.2011.12.005.

Bogaschewsky, Ronald; Essig, Michael; Lasch, Rainer; Stölzle, Wolfgang (2010): Supply Management Research. Aktuelle Forschungsergebnisse 2010. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden (Advanced studies in supply management, 3).

Bottomley, Paul A.; Doyle, John R.; Green, Rodney H. (2000): Testing the Reliability of Weight Elicitation Methods. Direct Rating Versus Point Allocation. In: *Journal of Marketing Research* 37 (4), S. 508–513. DOI: 10.1509/jmkr.37.4.508.18794.

Bozóki, Sándor; Dezső, Linda; Poesz, Attila; Temesi, József (2013): Analysis of pairwise comparison matrices. An empirical research. In: *Ann Oper Res* 211 (1), S. 511–528. DOI: 10.1007/s10479-013-1328-1.

Brans, Jean-Pierre; Mareschal, Bertrand (2005): Promethee Methods. In: José Figueira, Salvatore Greco und Matthias Ehrgott (Hg.): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys, Bd. 78. New York, N.Y.: Springer (International Series in Operations Research & Management Science), S. 163–186.

Brauchlin, Emil; Heene, Robert (1995): Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik. Eine Einführung. 4 vollst. überarb. Aufl. Bern: P. Haupt (Uni-Taschenbücher, 1738).

Briggs, Th.; Kunsch, P. L.; Mareschal, B. (1990): Nuclear waste management. An application of the multicriteria PROMETHEE methods. In: *European Journal of Operational Research* 44 (1), S. 1–10. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90308-X.

Browne, David; O'Regan, Bernadette; Moles, Richard (2010): Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region☆. In: *Energy* 35 (2), S. 518–528. DOI: 10.1016/j.energy.2009.10.020.

Buehlmann, Urs; Ragsdale, Cliff T.; Gfeller, B. (2000): A spreadsheet-based decision support system for wood panel manufacturing. In: *Decision Support Systems* 29 (3), S. 207–227. DOI: 10.1016/S0167-9236(00)00072-5.

Büyüközkan, Gülçin; Çifçi, Gizem (2012): A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. In: *Expert Systems with Applications* 39 (3), S. 2341–2354. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.08.061.

Büyüközkan, Gülçin; Çifçi, Gizem; Güleryüz, Sezin (2011): Strategic analysis of healthcare service quality using fuzzy AHP methodology. In: *Expert Systems with Applications* 38 (8), S. 9407–9424. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.01.103.

Byun, H. S.; Lee, K. H. (2005): A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. In: *Int J Adv Manuf Technol* 26 (11-12), S. 1338–1347. DOI: 10.1007/s00170-004-2099-2.

Calizaya, Andrés; Meixner, Oliver; Bengtsson, Lars; Berndtsson, Ronny (2010): Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) for Integrated Water Resources Management (IWRM) in the Lake Poopo Basin, Bolivia. In: *Water Resour Manage* 24 (10), S. 2267–2289. DOI: 10.1007/s11269-009-9551-x.

Celik, Erkan; Aydin, Nezir; Gumus, Alev Taskin (2014): A multiattribute customer satisfaction evaluation approach for rail transit network. A real case study for Istanbul, Turkey. In: *Transport Policy* 36, S. 283–293. DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.09.005.

Chamodrakas, I.; Batis, D.; Martakos, D. (2010): Supplier selection in electronic marketplaces using satisficing and fuzzy AHP. In: *Expert Systems with Applications* 37 (1), S. 490–498. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.05.043.

Chan, Felix T. S.; Kumar, N.; Tiwari, M. K.; Lau, H. C. W.; Choy, K. L. (2008): Global supplier selection. A fuzzy-AHP approach. In: *International Journal of Production Research* 46 (14), S. 3825–3857. DOI: 10.1080/00207540600787200.

Chang, Kuo-Hao (2014): A decision support system for planning and coordination of hybrid renewable energy systems. In: *Decision Support Systems* 64, S. 4–13. DOI: 10.1016/j.dss.2014.04.001.

Chari, Kaushal; Baker, Joanna R.; Lattimore, Pamela K. (1998): A decision support system for partial drug testing. DSS-DT. In: *Decision Support Systems* 23 (3), S. 241–257. DOI: 10.1016/S0167-9236(98)00047-5.

Chen, Chen-Tung (2000): Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. In: *Fuzzy Sets and Systems* 114 (1), S. 1–9. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00377-1.

Chiang, Tzu-An; Che, Z. H. (2015): A decision-making methodology for low-carbon electronic product design. In: *Decision Support Systems* 71, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.dss.2015.01.004.

Choffray, Jean Marie; Lilien, Gary L. (1986): A decision-support system for evaluating sales prospects and launch strategies for new products. In: *Industrial Marketing Management* 15 (1), S. 75–85. DOI: 10.1016/0019-8501(86)90046-5.

Chou, Shuo-Yan; Chang, Yao-Hui; Shen, Chun-Ying (2008): A fuzzy simple additive weighting system under group decision-making for facility location selection with objective/subjective attributes. In: *European Journal of Operational Research* 189 (1), S. 132–145. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.05.006.

CHOU, S.; CHANG, Y. (2008): A decision support system for supplier selection based on a strategy-aligned fuzzy SMART approach. In: *Expert Systems with Applications* 34 (4), S. 2241–2253. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.03.001.

Chu, Jianyu; Su, Youpo (2012): The Application of TOPSIS Method in Selecting Fixed Seismic Shelter for Evacuation in Cities. In: *Systems Engineering Procedia* 3, S. 391–397. DOI: 10.1016/j.sepro.2011.10.061.

Coutinho-Rodrigues, João; Simão, Ana; Antunes, Carlos Henggeler (2011): A GIS-based Multicriteria Spatial Decision Support System for Planning Urban Infrastructures. In: *Decision Support Systems* 51 (3), S. 720–726. DOI: 10.1016/j.dss.2011.02.010.

Csutora, Robert; Buckley, James J. (2001): Fuzzy hierarchical analysis. The Lambda-Max method. In: *Fuzzy Sets and Systems* 120 (2), S. 181–195. DOI: 10.1016/S0165-0114(99)00155-4.

Dağdeviren, Metin (2008): Decision making in equipment selection. An integrated approach with AHP and PROMETHEE. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 (4), S. 397–406. DOI: 10.1007/s10845-008-0091-7.

Dağdeviren, Metin; Yavuz, Serkan; Kılınç, Nevzat (2009): Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. In: *Expert Systems with Applications* 36 (4), S. 8143–8151. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.10.016.

Deng, Xinyang; Hu, Yong; Deng, Yong; Mahadevan, Sankaran (2014): Supplier selection using AHP methodology extended by D numbers. In: *Expert Systems with Applications* 41 (1), S. 156–167. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.07.018.

Dietrich, Jörg (2006): Entwicklung einer Methodik zur systemanalytischen Unterstützung adaptierbarer Entscheidungsprozesse bei der integrierten Flussgebietsbewirtschaftung. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Hydrologie (Dissertation).

Ding, Ji-Feng (2011): An Integrated Fuzzy Topsis Method for Ranking Alternatives and its Application. In: *Journal of Marine Science and Technology* 19 (4), S. 341–352.

Dios, Manuel; Molina-Pariente, Jose M.; Fernandez-Viagas, Victor; Andrade-Pineda, Jose L.; Framinan, Jose M. (2015): A Decision Support System for Operating Room scheduling. In: *Computers & Industrial Engineering* 88, S. 430–443. DOI: 10.1016/j.cie.2015.08.001.

Doumpos, Michael; Zopounidis, Constantin (2010): A multicriteria decision support system for bank rating. In: *Decision Support Systems* 50 (1), S. 55–63. DOI: 10.1016/j.dss.2010.07.002.

Du Bois, Ph.; Brans, J. P.; Cantraine, F.; Mareschal, B. (1989): MEDICIS. An expert system for computer-aided diagnosis using the PROMETHEE multicriteria method. In: *European Journal of Operational Research* 39 (3), S. 284–292. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90166-5.

Duarte, Antonio A. L.; Rodrigues, Gisela; Ramos, Rui (2009): Effect of criteria weighting methods on the ranking of water suppliers' performance. In: Nikos Mastorakis (Hg.): Energy, environment, ecosystems, development and landscape architecture. Proceedings of the 5th international conference on energy, environment, ecosystems and sustainable development (EEESD '09). FasangharíFasangharíFasanghari: WSEAS Press (Energy and environmental engineering series).

E. J. Mishan (1976): Elements of Cost-Benfit-Analysis. London.

Eisenführ, Franz; Langer, Thomas; Weber, Martin (2010): Rationales Entscheiden. 5., überarb. u. erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

Fasanghari, Mehdi; Gholamy, Navid; Chaharsooghi, S. Kamal; Qadami, Shohre; Delgosha, Mohamad Soltani (2008): The Fuzzy Evaluation of E-Commerce Customer Satisfaction Utilizing Fuzzy TOPSIS. In: Fei Yu (Hg.): International Symposium on Electronic Commerce and Security; ISECS. Guangzhou City, China, 3.-5. August 2008. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society, S. 870–874.

Fazi, Stefano; Fransoo, Jan C.; van Woensel, Tom (2015): A decision support system tool for the transportation by barge of import containers. A case study. In: *Decision Support Systems* 79, S. 33–45. DOI: 10.1016/j.dss.2015.08.001.

Fernandez, Eduardo; Navarro, Jorge; Duarte, Alfonso; Ibarra, Guillermo (2013): Core. A decision support system for regional competitiveness analysis based on multi-criteria sorting. In: *Decision Support Systems* 54 (3), S. 1417–1426. DOI: 10.1016/j.dss.2012.12.009.

Figueira, José; Roy, Bernard (2002): Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. In: *European Journal of Operational Research* 139 (2), S. 317–326. DOI: 10.1016/S0377-2217(01)00370-8.

Fischer, Gregory W. (1979): Utility Models for Multiple Objective Decisions. Do they accutately represent Human Preferences? In: *Decision Sciences* 10 (3), S. 451–479. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1979.tb00037.x.

García, Fernando; Guijarro, Francisco; Moya, Ismael (2010): A goal programming approach to estimating performance weights for ranking firms. In: *Computers & Operations Research* 37 (9), S. 1597–1609. DOI: 10.1016/j.cor.2009.11.018.

Garg, Amit X.; Adhikari, Neill K. J.; McDonald, Heather; Rosas-Arellano, M. Patricia; Devereaux, P. J.; Beyene, Joseph et al. (2005): Effects of computerized clinical decision support systems on practitioner performance and patient outcomes. A systematic review. In: *JAMA* 293 (10), S. 1223–1238. DOI: 10.1001/jama.293.10.1223.

Geldermann, Jutta (1999): Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, 105).

Georgopoulou, E.; Lalas, D.; Papagiannakis, L. (1997): A multicriteria decision aid approach for energy planning problems. The case of renewable energy option. In: *European Journal of Operational Research* 103 (1), S. 38–54. DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00263-9.

Ghodsypour, S. H.; O'Brien, C. (1998): A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. In: *International Journal of Production Economics* 56-57, S. 199–212. DOI: 10.1016/S0925-5273(97)00009-1.

Giachetti, Ronald E. (1998): A decision support system for material and manufacturing process selection. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 9 (3), S. 265–276. DOI: 10.1023/A:1008866732609.

Goossens, Adriaan J.M.; Basten, Rob J.I. (2015): Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; An application for naval ships. In: *Reliability Engineering & System Safety* 142, S. 31–41. DOI: 10.1016/j.ress.2015.04.014.

Gottschlich, Jörg; Hinz, Oliver (2014): A decision support system for stock investment recommendations using collective wisdom. In: *Decision Support Systems* 59, S. 52–62. DOI: 10.1016/j.dss.2013.10.005.

Govindan, Kannan; Jepsen, Martin Brandt (2016): ELECTRE. A comprehensive literature review on methodologies and applications. In: *European Journal of Operational Research* 250 (1), S. 1–29. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.07.019.

Greco, Salvatore; Ehrgott, Matthias; Figueira, José Rui (Hg.) (2016): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. 2nd ed. New York, NY: Springer New York (International Series in Operations Research & Management Science, 233).

Guelman, Leo; Guillén, Montserrat; Pérez-Marín, Ana M. (2015): A decision support framework to implement optimal personalized marketing interventions. In: *Decision Support Systems* 72, S. 24–32. DOI: 10.1016/j.dss.2015.01.010.

Gumus, Alev Taskin (2009): Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. In: *Expert Systems with Applications* 36 (2), S. 4067–4074. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.03.013.

Gunasekaran, Angappa; Ngai, Eric W.T. (2012): Decision support systems for logistics and supply chain management. In: *Decision Support Systems* 52 (4), S. 777–778. DOI: 10.1016/j.dss.2011.11.012.

Guo, Yan; Yu, Zhaoyu (2011): The Comprehensive Evaluation of Railway Freight Enterprises' Performance Based on the Balanced Scorecard Card and AHP. In: IEEE Staff (Hg.): 2011 International Conference on Management and Service Science. Wuhan, China: IEEE, S. 1–4.

Harth, Michael (2006): Multikriterielle Bewertung als Beitrag zur Entscheidungsfindung in der Landnutzungsplanung. Institut für Agrarökonomie und Agrarraumgestaltung. Halle (Dissertation).

Herrera, F.; Herrera-Viedma, E.; Martinez, L. (2008): A Fuzzy Linguistic Methodology to Deal With Unbalanced Linguistic Term Sets. In: *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 16 (2), S. 354–370. DOI: 10.1109/TFUZZ.2007.896353.

Hong, Zhen; Lee, C. K.M. (2013): A decision support system for procurement risk management in the presence of spot market. In: *Decision Support Systems* 55 (1), S. 67–78. DOI: 10.1016/j.dss.2012.12.031.

Hu, Zhi-Hua; Sheng, Zhao-Han (2014): A decision support system for public logistics information service management and optimization. In: *Decision Support Systems* 59, S. 219–229. DOI: 10.1016/j.dss.2013.12.001.

İç, Yusuf Tansel (2014): A TOPSIS based design of experiment approach to assess company ranking. In: *Applied Mathematics and Computation* 227, S. 630–647. DOI: 10.1016/j.amc.2013.11.043.

Ignatius, J.; Behzadian, M.; Malekan, H. S.; Lalitha, D. (2012): Financial performance of Iran's Automotive sector based on PROMETHEE II. In: IEEE 6th International Conference on Management of Innovation and Technology (ICMIT), 2012. 11.-13. June 2012. JiangJiang. Bali, Indonesia. Piscataway, NJ: IEEE, S. 35–38.

Jahan, Ali; Edwards, Kevin L. (2013): Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design. Amsterdam, Boston: Elsevier/BH.

Jankowski, Piotr; Zielinska, Arika-Ligmann; Swobodzinski, Martin (2008): Choice Modeler. A Web-based Spatial Multiple Criteria Evaluation Tool. In: *Transactions in GIS* 12 (4), S. 541–561. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2008.01111.x.

Jiang, Chen Zhao; Yan, Zhang (2010): Application of TOPSIS analysis method based on AHP in bid evaluation of power equipment. In: 2010 2nd IEEE International Conference on Information and Financial Engineering. Chongqing, China. Piscataway: IEEE, S. 193–196.

Jones, J. W. (1993): Decision support systems for agricultural development. In: Frits Penning de Vries, Paul Teng und Klaas Metselaar (Hg.): Systems approaches for agricultural development. Boston: Kluwer Academic Publishers (Systems approaches for sustainable agricultural development, 2), S. 459–471.

Ju, Yanbing; Wang, Aihua (2012): Emergency alternative evaluation under group decision makers. A method of incorporating DS/AHP with extended TOPSIS. In: *Expert Systems with Applications* 39 (1), S. 1315–1323. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.08.012.

Kahraman, Cengiz; Cebeci, Ufuk; Ulukan, Ziya (2003): Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. In: *Logistics Information Mngt* 16 (6), S. 382–394. DOI: 10.1108/09576050310503367.

Kahraman, Cengiz; Yasin Ateş, Nüfer; Çevik, Sezi; Gülbay, Murat; Ayça Erdoğan, S. (2007): Hierarchical fuzzy TOPSIS model for selection among logistics information technologies. In: *Journal of Ent Info Management* 20 (2), S. 143–168. DOI: 10.1108/17410390710725742.

Kaliszewski, I.; Podkopaev, D. (2016): Simple additive weighting—A metamodel for multiple criteria decision analysis methods. In: *Expert Systems with Applications* 54, S. 155–161. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.01.042.

Kallestrup, Kasper Bislev; Lynge, Lasse Hadberg; Akkerman, Renzo; Oddsdottir, Thordis Anna (2014): Decision support in hierarchical planning systems. The case of procurement planning in oil refining industries. In: *Decision Support Systems* 68, S. 49–63. DOI: 10.1016/j.dss.2014.09.003.

Kalogeras, Nikos; Baourakis, George; Zopounidis, Costantin; van Dijk, Gert (2005): Evaluating the financial performance of agri-food firms. A multicriteria decision-aid approach. In: *Journal of Food Engineering* 70 (3), S. 365–371. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.01.039.

Kannan, Devika; Khodaverdi, Roohollah; Olfat, Laya; Jafarian, Ahmad; Diabat, Ali (2013): Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. In: *Journal of Cleaner Production* 47, S. 355–367. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.010.

Kapepula, Ka-Mbayu; Colson, Gerard; Sabri, Karim; Thonart, Philippe (2007): A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 27 (11), S. 1690–1705. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.07.009.

Karnatak, Harish Chandra; Saran, Sameer; Bhatia, Karamjit; Roy, P. S. (2007): Multicriteria Spatial Decision Analysis in Web GIS Environment. In: *Geoinformatica* 11 (4), S. 407–429. DOI: 10.1007/s10707-006-0014-8.

Kaya, Tolga; Kahraman, Cengiz (2011): Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. In: *Expert Systems with Applications* 38 (6), S. 6577–6585. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.081.

Keeney, Ralph L.; Raiffa, Howard (1994): Decisions with Multiple Objectives. Preferences and Value Tradeoffs. New York: J. Wiley.

Kengpol, Athakorn (2004): Design of a decision support system to evaluate the investment in a new distribution centre. In: *International Journal of Production Economics* 90 (1), S. 59–70. DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00042-2.

Kilincci, Ozcan; Onal, Suzan Aslı (2011): Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. In: *Expert Systems with Applications* 38 (8), S. 9656–9664. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.01.159.

Kodikara, P. N.; Perera, B.J.C.; Kularathna, M.D.U.P. (2010): Stakeholder preference elicitation and modelling in multi-criteria decision analysis – A case study on urban water supply. In: *European Journal of Operational Research* 206 (1), S. 209–220. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.02.016.

Kolli, Sai; Parsaei, Hamid R. (1992): Multi-criteria analysis in the evaluation of advanced manufacturing technology using promethee. In: *Computers & Industrial Engineering* 23 (1-4), S. 455–458. DOI: 10.1016/0360-8352(92)90159-H.

Koo, Choongwan; Hong, Taehoon; Kim, Jimin (2014): A decision support system for determining the optimal size of a new expressway service area. Focused on the profitability. In: *Decision Support Systems* 67, S. 9–20. DOI: 10.1016/j.dss.2014.07.005.

Kristianto, Yohanes; Gunasekaran, Angappa; Helo, Petri; Sandhu, Maqsood (2012): A decision support system for integrating manufacturing and product design into the reconfiguration of the supply chain networks. In: *Decision Support Systems* 52 (4), S. 790–801. DOI: 10.1016/j.dss.2011.11.014.

Kromrey, Helmut; Roose, Jochen; Strübing, Jörg (2016): Empirische Sozialforschung. Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung : mit Annotationen aus qualitativ-interpretativer Perspektive. 13., völlig überarb. Aufl. Konstanz: UVK (UTB. Soziologie, 8681).

Kwon, Eun-ha; Ko, Won Il (2009): Evaluation method of nuclear nonproliferation credibility. In: *Annals of Nuclear Energy* 36 (7), S. 910–916. DOI: 10.1016/j.anucene.2009.03.012.

Landry, Steven J.; Chen, Xin W.; Nof, Shimon Y. (2013): A decision support methodology for dynamic taxiway and runway conflict prevention. In: *Decision Support Systems* 55 (1), S. 165–174. DOI: 10.1016/j.dss.2013.01.016.

Laux, Helmut; Gillenkirch, Robert M.; Schenk-Mathes, Heike Yasmin (2014): Entscheidungstheorie. 9., vollst. überarb. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler (Springer-Lehrbuch).

Le Téno, J. F.; Mareschal, B. (1998): An interval version of PROMETHEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality. In: *European Journal of Operational Research* 109 (2), S. 522–529. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00074-5.

Lei, Ningrong; Moon, Seung Ki (2015): A Decision Support System for market-driven product positioning and design. In: *Decision Support Systems* 69, S. 82–91. DOI: 10.1016/j.dss.2014.11.010.

Li, Li; Liu, Fei; Li, Congbo (2014): Customer satisfaction evaluation method for customized product development using Entropy weight and Analytic Hierarchy Process. In: *Computers & Industrial Engineering* 77, S. 80–87. DOI: 10.1016/j.cie.2014.09.009.

Liefer, Randal K.; Valasek, John; Eggold, David P.; Downing, David R. (1992): Fighter Agility Metrics: Research and Test. In: *Journal of Aircraft* 29 (3), S. 452–457. DOI: 10.2514/3.46182.

Lin, Chin-Tsai; Tsai, Meng-Chuan (2010): Location choice for direct foreign investment in new hospitals in China by using ANP and TOPSIS. In: *Qual Quant* 44 (2), S. 375–390. DOI: 10.1007/s11135-008-9199-2.

Lin, Lin; Hu, Paul Jen-Hwa; Liu Sheng, Olivia R. (2006): A decision support system for lower back pain diagnosis. Uncertainty management and clinical evaluations. In: *Decision Support Systems* 42 (2), S. 1152–1169. DOI: 10.1016/j.dss.2005.10.007.

Lin, Ming-Chyuan; Wang, Chen-Cheng; Chen, Ming-Shi; Chang, C. Alec (2008): Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process. In: *Computers in Industry* 59 (1), S. 17–31. DOI: 10.1016/j.compind.2007.05.013.

Liu, Canran; Frazier, Paul; Kumar, Lalit; Macgregor, Catherine; Blake, Nigel (2006): Catchment-wide wetland assessment and prioritization using the multi-criteria decision-making method TOPSIS. In: *Environmental management* 38 (2), S. 316–326. DOI: 10.1007/s00267-005-0151-0.

Lobach, David F.; Hammond, W.Ed (1997): Computerized Decision Support Based on a Clinical Practice Guideline Improves Compliance with Care Standards. In: *The American Journal of Medicine* 102 (1), S. 89–98. DOI: 10.1016/S0002-9343(96)00382-8.

Machiwal, Deepesh; Jha, Madan K.; Mal, Bimal C. (2011): Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques. In: *Water Resour Manage* 25 (5), S. 1359–1386. DOI: 10.1007/s11269-010-9749-y.

Madanu, Sunil K.; Mattingly, Stephen P.; Kam, Katie A.; Ardekani, Siamak A. (2015): Integrated Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution Framework for Evaluating High-Speed Passenger Rail Corridor Alternatives. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2499, S. 1–9. DOI: 10.3141/2499-01.

Malczewski, Jacek (1999): GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York, Toronto: J. Wiley.

Mandic, Ksenija; Delibasic, Boris; Knezevic, Snezana; Benkovic, Sladjana (2014): Analysis of the financial parameters of Serbian banks through the application of the fuzzy AHP and TOPSIS methods. In: *Economic Modelling* 43, S. 30–37. DOI: 10.1016/j.econmod.2014.07.036.

Manoliadis, Odysseus G.; Pantouvakis, John Paris; Tsolas, Ioannis E. (2007): compromise programming model in site selection for construction temporary facilities. In: *Oper Res Int J* 7 (3), S. 381–400. DOI: 10.1007/BF03024854.

Manthey, Laura (2007): Methoden der Präferenzmessung. Grundlagen, Konzepte und experimentelle Untersuchungen. Norderstedt: Books on Demand.

Mareschal, B.; Mertens, D. (2012): BANKS a Multicriteria, PROMETHEE-based, Decision Support System for the Evaluation of the International Banking Sector. In: *Journal of Decision Systems* 1 (2-3), S. 175–189. DOI: 10.1080/12460125.1992.10511524.

Margaliot, Michael (2007): Mathematical Modeling of Natural Phenomena: A Fuzzy Logic Approach. In: Paul P. Wang (Hg.): Fuzzy logic. A spectrum of theoretical & practical issues, Bd. 215. Berlin [u.a.]: Springer (Studies in Fuzziness and Soft Computing, 215), S. 113–134.

Marquez, Adolfo Crespo; Blanchar, Carol (2006): A Decision Support System for evaluating operations investments in high-technology business. In: *Decision Support Systems* 41 (2), S. 472–487. DOI: 10.1016/j.dss.2004.08.012.

Mattiussi, Alessandro; Rosano, Michele; Simeoni, Patrizia (2014): A decision support system for sustainable energy supply combining multi-objective and multi-attribute analysis. An Australian case study. In: *Decision Support Systems* 57, S. 150–159. DOI: 10.1016/j.dss.2013.08.013.

McDonnell Douglas Astronautics Company (1999): The USAF Stability and Control DATCOM. Volume I: Users Manual. Version 2.

Mergias, I.; Moustakas, K.; Papadopoulos, A.; Loizidou, M. (2007): Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for ELVs. The case of Cyprus. In: *Journal of hazardous materials* 147 (3), S. 706–717. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.071.

Metzner, Steffen; Sawitzky, Mareen (2016): Priorisierung von Immobilienmärkten mittels ELECTRE. Nutzung eines Outranking-Modells im taktischen Portfoliomanagement. In: *Z Immobilienökonomie* 2 (2), S. 121–144. DOI: 10.1365/s41056-016-0017-y.

Morawietz, Sten; Strohal, Michael; Stütz, Peter (2016): Consideration of Sensor Surveillance Capabilities within the Holistic Evaluation of Aerial Platforms. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016*.

Müller-Herbers, Sabine (2007): Methoden zur Beurteilung von Varianten. 4. Aufl. Fakultät Architektur und Stadtplanung, Institut für Grundlagen der Planung.

Murty, Katta G.; Liu, Jiyin; Wan, Yat-wah; Linn, Richard (2005): A decision support system for operations in a container terminal. In: *Decision Support Systems* 39 (3), S. 309–332. DOI: 10.1016/j.dss.2003.11.002.

Nakamori, Y.; Sawaragi, Y. (1996): Methodology and systems for environmental decision support. In: *Annual Reviews in Control* 20, S. 143–154. DOI: 10.1016/S1367-5788(97)00012-6.

Nakayama, Hirotaka (op. 2003): MOP/GP Approaches to Data Mining. In: Tamaki Tanaka, Masahiro Inuiguchi und Tetsuzo Tanino (Hg.): Multi-objective programming and goal programming. Theory and applications. New York: Springer, S. 27–34.

Natividade-Jesus, Eduardo; Coutinho-Rodrigues, João; Antunes, Carlos Henggeler (2007): A multicriteria decision support system for housing evaluation. In: *Decision Support Systems* 43 (3), S. 779–790. DOI: 10.1016/j.dss.2006.03.014.

Newell, Graeme; Seabrook, Ross (2006): Factors influencing hotel investment decision making. In: *J of Property Inv & Finance* 24 (4), S. 279–294. DOI: 10.1108/14635780610674499.

Ngai, E.W.T.; Leung, T.K.P.; Wong, Y. H.; Lee, M.C.M.; Chai, P.Y.F.; Choi, Y. S. (2012): Design and development of a context-aware decision support system for real-time accident handling in logistics. In: *Decision Support Systems* 52 (4), S. 816–827. DOI: 10.1016/j.dss.2011.11.016.

Nitzsch, Rüdiger von (1992): Entscheidung bei Zielkonflikten. Ein PC-gestütztes Verfahren. Wiesbaden: Gabler (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 95).

Nitzsch, Rüdiger von (2011): Entscheidungslehre. Wie Menschen entscheiden und wie sie entscheiden sollten. 6. Aufl. Aachen: Wissenschatsverlag Mainz.

Oberschmidt, Julia (2010): Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Göttingen. Göttingen (Dissertation).

Oeltjenbruns, Henning; Kolarik, William J.; Schnadt-Kirschner, Ralf (1995): Strategic planning in manufacturing systems — AHP application to an equipment replacement decision. In: *International Journal of Production Economics* 38 (2-3), S. 189–197. DOI: 10.1016/0925-5273(94)00092-O.

Olson, David L. (Hg.) (2012): Decision aids for selection problems: Springer.

Önüt, Semih; Kara, Selin Soner; Işik, Elif (2009): Long Term Supplier Selection using a Combined Fuzzy MCDM Approach. A Case Study for a Telecommunication Company. In: *Expert Systems with Applications* 36 (2), S. 3887–3895. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.02.045.

Özcan, Tuncay; Çelebi, Numan; Esnaf, Şakir (2011): Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem. In: *Expert Systems with Applications* 38 (8), S. 9773–9779. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.02.022.

Ozsahin, Dilber Uzun; Uzun, Berna; Musa, Musa Sani; Şentürk, Niyazi; Nurçin, Fatih Veysel; Ozsahin, Ilker (2017): Evaluating nuclear medicine imaging devices using fuzzy PROMETHEE method. In: *Procedia Computer Science* 120, S. 699–705. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.298.

Öztayşi, Başar; Bolturk, Eda (2014): Fuzzy Methods for Demand Forecasting in Supply Chain Management. In: Cengiz Kahraman und Başar Öztayşi (Hg.): Supply Chain Management Under Fuzziness. Recent Developments and Techniques, Bd. 313. Berlin, Heidelberg: Springer (Studies in Fuzziness and Soft Computing, 313), S. 243–268.

Palma, J.; Graves, A. R.; Burgess, P. J.; van der Werf, W.; Herzog, F. (2007): Integrating environmental and economic performance to assess modern silvoarable agroforestry in Europe. In: *Ecological Economics* 63 (4), S. 759–767. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.01.011.

Panagopoulos, George P.; Bathrellos, George D.; Skilodimou, Hariklia D.; Martsouka, Faini A. (2012): Mapping Urban Water Demands Using Multi-Criteria Analysis and GIS. In: *Water Resource Management* 26 (5), S. 1347–1363. DOI: 10.1007/s11269-011-9962-3.

PanGeo (2009): Grundlagen der Methodik und Anforderungen bei der vergleichenden Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen. Abschlussbericht.

Papakostas, N.; Papachatzakis, P.; Xanthakis, V.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G. (2010): An approach to operational aircraft maintenance planning. In: *Decision Support Systems* 48 (4), S. 604–612. DOI: 10.1016/j.dss.2009.11.010.

Pastijn, Hugo; Leysen, Jan (1989): Constructing an outranking relation with ORESTE. In: *Mathematical and Computer Modelling* 12 (10-11), S. 1255–1268. DOI: 10.1016/0895-7177(89)90367-1.

Pestotnik, Stanley L. (1996): Implementing Antibiotic Practice Guidelines through Computer-Assisted Decision Support. Clinical and Financial Outcomes. In: *Ann Intern Med* 124 (10), S. 884. DOI: 10.7326/0003-4819-124-10-199605150-00004.

Pourghahreman, Narges; Rajabzadeh Qhatari, Ali (2015): Supplier selection in an agent based pharmaceutical supply chain. An application of TOPSIS and PROMETHEE Π. In: *10.5267/j.uscm* 3 (3), S. 231–240. DOI: 10.5267/j.uscm.2015.4.001.

Prakash, Nikhil; Sarkar, Aratrika (2015): Development of an intelligent decision support system for an hierarchical business organization. In: Satyajit Chakrabar und Himadri Nath Saha (Hg.): 2015 International Conference and Workshop on Computing and Communication (IEMCON). Vancouver, BC, Canada, 15.-17. October 2015. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–8.

Rahman, Zillur; Qureshi, M. N. (2009): Fuzzy approach to measuring healthcare service quality. In: *IJBHR* 1 (2), S. 105. DOI: 10.1504/IJBHR.2009.024224.

Rakes, Terry R.; Deane, Jason K.; Rees, Loren P.; Fetter, Gary M. (2014): A decision support system for post-disaster interim housing. In: *Decision Support Systems* 66, S. 160–169. DOI: 10.1016/j.dss.2014.06.012.

Rao, R. V.; Patel, B. K. (2010): A subjective and objective integrated multiple attribute decision making method for material selection. In: *Materials & Design* 31 (10), S. 4738–4747. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.014.

Rao, R. V.; Patel, B. K.; Parnichkun, M. (2011): Industrial robot selection using a novel decision making method considering objective and subjective preferences. In: *Robotics and Autonomous Systems* 59 (6), S. 367–375. DOI: 10.1016/j.robot.2011.01.005.

Recio, B.; Ibáñez, J.; Rubio, F.; Criado, J. A. (2005): A decision support system for analysing the impact of water restriction policies. In: *Decision Support Systems* 39 (3), S. 385–402. DOI: 10.1016/j.dss.2003.11.003.

Rees, Loren Paul; Deane, Jason K.; Rakes, Terry R.; Baker, Wade H. (2011): Decision support for Cybersecurity risk planning. In: *Decision Support Systems* 51 (3), S. 493–505. DOI: 10.1016/j.dss.2011.02.013.

Rezagholizadeh, Mehdi; Fereidunian, Alireza; Dehghan, Behrad; Moshiri, Behzad; Lesani, Hamid (2011): Multi criteria decision making (MCDM). A modified partial order theory (POT) approach. In: Kuanquan Wang (Hg.): 2011 3rd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC 2011). Harbin, China, 18.-20. January 2011. Piscataway, NJ: IEEE, S. 650–655.

Rohr, Torsten (2004): Einsatz eines mehrkriteriellen Entscheidungsverfahrens im Naturschutzmanagement. Dargestellt am Naturschutzprojekt "Weidelandschaft Eidertal". Agrarwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrechts-Universität. Kiel (Dissertation).

Rouyendegh, Babak Daneshvar; Erkan, Turan Erman (2013): An Application of the Fuzzy ELECTRE Method for Academic Staff Selection. In: *Hum. Factors Man.* 23 (2), S. 107–115. DOI: 10.1002/hfm.20301.

Ruhland, Alexander (2004): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Verfahren der Trinkwasseraufbereitung an den Beispielen Arsenentfernung und zentrale Enthärtung. Berlin (Dissertation).

Saaty, T. L.; Hu, G. (1998): Ranking by Eigenvector versus other methods in the Analytic Hierarchy Process. In: *Applied Mathematics Letters* 11 (4), S. 121–125. DOI: 10.1016/S0893-9659(98)00068-8.

Saaty, Thomas L. (1990): How to make a Decision. The Analytic Hierarchy Process. In: *European Journal of Operational Research* 48 (1), S. 9–26. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.

Saaty, Thomas L. (2008): Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. In: *IJSSCI* 1 (1), S. 83. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

Saaty, Thomas L. (2011): Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: Daniel L. Schmoldt (Hg.): The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making, Bd. 3. Dordrecht, London: Springer (Managing Forest Ecosystems), S. 15–35.

Sadrian, Amir A.; Yoon, Yong S. (1994): A Procurement Decision Support System in Business Volume Discount Environments. In: *Operations Research* 42 (1), S. 14–23. DOI: 10.1287/opre.42.1.14.

Sahebjamnia, Navid; Torabi, S. Ali; Mansouri, S. Afshin (2017): A hybrid decision support system for managing humanitarian relief chains. In: *Decision Support Systems* 95, S. 12–26. DOI: 10.1016/j.dss.2016.11.006.

Saracoglu, Burak Omer (2015): An Experimental Research Study on the Solution of a Private Small Hydropower Plant Investments Selection Problem by ELECTRE III/IV, Shannon's Entropy, and Saaty's Subjective Criteria Weighting. In: *Advances in Decision Sciences* 2015 (1), S. 1–20. DOI: 10.1155/2015/548460.

Schulte, Ulrich (1993): Einführung in die Fuzzy-Logik. Fortschritt durch Unschärfe. München: Franzis.

Seçme, Neşe Yalçın; Bayrakdaroğlu, Ali; Kahraman, Cengiz (2009): Fuzzy performance evaluation in Turkish Banking Sector using Analytic Hierarchy Process and TOPSIS. In: *Expert Systems with Applications* 36 (9), S. 11699–11709. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.03.013.

Sennaroglu, Baha; Tuzkaya, Meltem (2016): An Interval valued Intuitionistic Fuzzy Promethee Approach for Hospital Service Quality Evaluation. In: Xianyi Zeng, Jie Lu, Etienne E. Kerre, Luis Martinez und Ludovic Koehl (Hg.): Conference on Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making (FLINS 2016). Roubaix, France, 24.–26. August 2016: World Scientific (World Scientific proceedings series on computer engineering and information science, Vol. 10), S. 588–594.

Senvar, Ozlem; Otay, Irem; Bolturk, Eda (2016): Hospital Site Selection via Hesitant Fuzzy TOPSIS. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (12), S. 1140–1145. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.656.

Shafii, Milad; Rafiei, Sima; Abooee, Fatemeh; Bahrami, Mohammad Amin; Nouhi, Mojtaba; Lotfi, Farhad; Khanjankhani, Khatere (2016): Assessment of Service Quality in Teaching Hospitals of Yazd University of Medical Sciences. Using Multi-criteria Decision Making Techniques. In: *Osong public health and research perspectives* 7 (4), S. 239–247. DOI: 10.1016/j.phrp.2016.05.001.

Shanian, A.; Milani, A. S.; Carson, C.; Abeyaratne, R. C. (2008): A new application of ELECTRE III and revised Simos' procedure for group material selection under weighting uncertainty. In: *Knowledge-Based Systems* 21 (7), S. 709–720. DOI: 10.1016/j.knosys.2008.03.028.

Shaw, Krishnendu; Shankar, Ravi; Yadav, Surendra S.; Thakur, Lakshman S. (2012): Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain. In: *Expert Systems with Applications* 39 (9), S. 8182–8192. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.149.

Shemshadi, Ali; Shirazi, Hossein; Toreihi, Mehran; Tarokh, M. J. (2011): A fuzzy VIKOR method for supplier selection based on entropy measure for objective weighting. In: *Expert Systems with Applications* 38 (10), S. 12160–12167. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.03.027.

Sim, I.; Gorman, P.; Greenes, R. A.; Haynes, R. B.; Kaplan, B.; Lehmann, H.; Tang, P. C. (2001): Clinical Decision Support Systems for the Practice of Evidence-based Medicine. In: *Journal of the American Medical Informatics Association* 8 (6), S. 527–534. DOI: 10.1136/jamia.2001.0080527.

Siskos, Eleftherios; Tsotsolas, Nikos (2015): Elicitation of criteria importance weights through the Simos method. A robustness concern. In: *European Journal of Operational Research* 246 (2), S. 543–553. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.037.

Smith, E. G.; Lindwall, C. W.; Green, M.; Pavlik, C. K. (1997): PARMS. A decision support system for planting and residue management. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 16 (3), S. 219–229. DOI: 10.1016/S0168-1699(96)00039-7.

Sodtke, Rainer Matthias (2003): Ein Entscheidungsunterstützungssystem für den Zwischenfruchtanbau - Konzeption, Entwicklung, Validierung. Kiel (Dissertation).

Sonneberg, Marc-Oliver; Kühne, Kathrin; Breitner Michael (2015): A Decision Support System for the Optimization of Electric Car Sharing Stations. In: *Thirty Sixth International Conference on Information Systems.*

Steinmetz, Tilmann (2007): Integration, Analyse und interaktive Visualisierung von Daten für das Risikomanagement großräumig kontaminierter Standorte. Naturwissenschaftliche Fakultät III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittemberg (Dissertation).

Strassert, Günter (1995): Das Abwägungsproblem bei multikriteriellen Entscheidungen. Grundlagen und Lösungsansatz, unter besonderer Berücksichtigung der Regionalplanung. Frankfurt am Main, New York: P. Lang.

Sun, Chia-Chi; Lin, Grace T.R. (2009): Using fuzzy TOPSIS method for evaluating the competitive advantages of shopping websites. In: *Expert Systems with Applications* 36 (9), S. 11764–11771. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.04.017.

Sun, Xiaoqian (2012): Multiple Criteria Decision Analysis Techniques in Aircraft Design and Evaluation Processes.

Supriyasilp, Thanaporn; Pongput, Kobkiat; Boonyasirikul, Thana (2009): Hydropower development priority using MCDM method. In: *Energy Policy* 37 (5), S. 1866–1875. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.01.023.

Tam, Maggie C.Y.; Tummala, V.M.Rao (2001): An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system. In: *Omega* 29 (2), S. 171–182. DOI: 10.1016/S0305-0483(00)00039-6.

Tesfamariam, Solomon; Sadiq, Rehan (2006): Risk-based Environmental Decision-Making using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (F-AHP). In: *Stoch Environ Res Ris Assess* 21 (1), S. 35–50. DOI: 10.1007/s00477-006-0042-9.

Toosi, S. L. Razavi; Samani, J. M. V. (2012): Evaluating Water Transfer Projects Using Analytic Network Process (ANP). In: *Water Resour Manage* 26 (7), S. 1999–2014. DOI: 10.1007/s11269-012-9995-2.

Törnquist, Johanna; Herbstritt, Marc (Hg.) (2006): Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching. A review of models and algorithms. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum fuer Informatik GmbH, Wadern/Saarbruecken, Germany.

Turcksin, Laurence; Bernardini, Annalia; Macharis, Cathy (2011): A combined AHP-PROMETHEE approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 20, S. 954–965. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.08.104.

Tuzkaya, Gülfem; Gülsün, Bahadır; Kahraman, Cengiz; Özgen, Doğan (2010): An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. In: *Expert Systems with Applications* 37 (4), S. 2853–2863. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.09.004.

Ursavas, Evrim (2014): A decision support system for quayside operations in a container terminal. In: *Decision Support Systems* 59, S. 312–324. DOI: 10.1016/j.dss.2014.01.003.

Vadher, B.; Patterson, D. L.; Leaning, M. (1997): Evaluation of a decision support system for initiation and control of oral anticoagulation in a randomised trial. In: *BMJ (Clinical research ed.)* 314 (7089), S. 1252–1256.

Vahidnia, Mohammad H.; Alesheikh, Ali A.; Alimohammadi, Abbas (2009): Hospital site selection using fuzzy AHP and its derivatives. In: *Journal of environmental management* 90 (10), S. 3048–3056. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.04.010.

van der Heyden, W.P.A.; Ottjes, J. A. (1985): A decision support system for the planning of the workload on a grain terminal. In: *Decision Support Systems* 1 (4), S. 293–297. DOI: 10.1016/0167-9236(85)90169-1.

van Valkenhoef, Gert; Tervonen, Tommi; Zwinkels, Tijs; Brock, Bert de; Hillege, Hans (2013): ADDIS. A decision support system for evidence-based medicine. In: *Decision Support Systems* 55 (2), S. 459–475. DOI: 10.1016/j.dss.2012.10.005.

Vego, Goran; Kucar-Dragicević, Savka; Koprivanac, Natalija (2008): Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 28 (11), S. 2192–2201. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.10.002.

Voogd, J. HenkH (1982): Multicriteria evaluation for urban and regional planning. Unter Mitarbeit von H. HenkM Goudappel und P. Nijkamp.

Walczak, Steven; Pofahl, Walter E.; Scorpio, Ronald J. (2003): A decision support tool for allocating hospital bed resources and determining required acuity of care. In: *Decision Support Systems* 34 (4), S. 445–456. DOI: 10.1016/S0167-9236(02)00071-4.

Wang, Jian-Jun; Yang, De-Li (2007): Using a hybrid multi-criteria decision aid method for information systems outsourcing. In: *Computers & Operations Research* 34 (12), S. 3691–3700. DOI: 10.1016/j.cor.2006.01.017.

Wang, Shengyuan; Liu, Peide (2007): The Evaluation Study on Location Selection of Logistics Center Based on Fuzzy AHP and TOPSIS. In: 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. September 21-25, 2007, Shanghai, China. 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China. Piscataway, NJ: IEEE, S. 3774–3777.

Wang, Ying-Ming; Luo, Ying (2010): Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making. In: *Mathematical and Computer Modelling* 51 (1-2), S. 1–12. DOI: 10.1016/j.mcm.2009.07.016.

Wilkinson, James H. (2009): The algebraic eigenvalue problem. Repr. Oxford: Clarendon Press (Oxford science publications).

Xu, Lida; Li, Zongbin; Li, Shancang; Tang, Fengming (2007): A decision support system for product design in concurrent engineering. In: *Decision Support Systems* 42 (4), S. 2029–2042. DOI: 10.1016/j.dss.2004.11.007.

Xue, Dan; Zhao, Qilan; Guo, Xinyi (2008): TOPSIS method for evaluation customer service satisfaction to fast food industry. In: Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. IEEE/SOLI '2008 : October 12-15, 2008, Beijing, China. 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). Beijing. New York: IEEE Xplore, S. 920–925.

Yang, Jiann Liang; Chiu, Huan Neng; Tzeng, Gwo-Hshiung; Yeh, Ruey Huei (2008): Vendor selection by integrated fuzzy MCDM techniques with independent and interdependent relationships. In: *Information Sciences* 178 (21), S. 4166–4183. DOI: 10.1016/j.ins.2008.06.003.

Yet, Barbaros; Bastani, Kaveh; Raharjo, Hendry; Lifvergren, Svante; Marsh, William; Bergman, Bo (2013): Decision support system for Warfarin therapy management using Bayesian networks. In: *Decision Support Systems* 55 (2), S. 488–498. DOI: 10.1016/j.dss.2012.10.007.

Yurdakul, Mustafa (2004): AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection. In: *Journal of Materials Processing Technology* 146 (3), S. 365–376. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.026.

Zadeh, L. A. (1965): Fuzzy Sets. In: *Information and Control* 8 (3), S. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

Zardari, Noorul Hassan; Ahmed, Kamal; Shirazi, Sharif Moniruzzaman; Yusop, Zulkifli Bin (2015): Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management. Cham: Springer International Publishing.

Zeng, Guang-ming (Hg.) (2003): Energy & environment - a world of challenges and opportunities. Proceedings of the EnerEnv '2003 Conference. EnerEnv Conference; International Conference on Energy and Environment. Beijing [u.a.]: Science Press.

Zhang, Jiyong; Fu, Shaochuan (2012): An Effective DEA-AHP Algorithm for Evaluation of Emergency Logistics Performance. In: *AISS* 4 (12), S. 1–8. DOI: 10.4156/aiss.vol4.issue12.1.

Zhang, Xiang Feng (2013): Combining AHP and TOPSIS Methods to Evaluate Investment for Wind Farm Construction. In: *AMR* 860-863, S. 280–286. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.280.

Zhao, Hongju; Peng, Yi; Li, Wei (2013): Revised PROMETHEE II for Improving Efficiency in Emergency Response. In: *Procedia Computer Science* 17, S. 181–188. DOI: 10.1016/j.procs.2013.05.025.

Zhu, Xiaoqian; Wang, Fei; Wang, Haiyan; Liang, Changzhi; Tang, Run; Sun, Xiaolei; Li, Jianping (2014): TOPSIS method for quality credit evaluation. A case of air-conditioning market in China. In: *Journal of Computational Science* 5 (2), S. 99–105. DOI: 10.1016/j.jocs.2013.02.001.

Zhuang, Zoe Y.; Wilkin, Carla L.; Ceglowski, Andrzej (2013): A framework for an intelligent decision support system. A case in pathology test ordering. In: *Decision Support Systems* 55 (2), S. 476–487. DOI: 10.1016/j.dss.2012.10.006.

Zimmer, Konrad (2016): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl und Steuerung von Lieferanten und Lieferketten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Produktion und Energie, Band 17).

Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): Multi-Criteria-Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin [u.a.]: Springer (Heidelberger Lehrtexte. Wirtschaftswissenschaften).

Zopounidis, Constantin; Kosmidou, Kyriaki (2008): The determinants of banks' profits in Greece during the period of EU financial integration. In: *Managerial Finance* 34 (3), S. 146–159. DOI: 10.1108/03074350810848036.