

Institut für Angewandte Systemforschung und
Operations Research (IASFOR)
Fakultät für Informatik
Universität der Bundeswehr München

**Zur aggregierten Abbildung
elementarer Gefechtsprozesse in
hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen**

Volker Pötzsch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigten Dissertation.

Promotionsausschuss

Vorsitzender: Prof. Dr. Fritz Lehmann
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Hans W. Hofmann
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Reiner K. Huber
Weiterer Prüfer: Prof. Dr. Uwe M. Borghoff
Weiterer Prüfer: Prof. Dr. Axel Lehmann

Tag der Prüfung

19.09.2003

Für Stéphanie

Danksagungen

Mein tiefster Dank gilt meiner Verlobten, für deren großes Verständnis, ihre Rücksichtnahme und stete Ermunterung.

Ebenfalls großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hans W. Hofmann, der durch ständiges Interesse, anregende und aufschlussreiche Diskussionen und nicht zuletzt hilfreiche Kritik das Entstehen dieser Arbeit in dem mir zur Verfügung stehenden Zeitraum erst ermöglicht hat.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meinen Eltern und einer Vielzahl an Kollegen und Freunden, welche durch Motivation und Rückhalt sowie häufige Gespräche, Anregungen und Tipps zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

ÜBERSICHT

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Problem der Aggregation in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen und dabei insbesondere mit Möglichkeiten zur aggregierten Abbildung der elementaren Gefechtsprozesse Bewegung, Zielaufklärung sowie aktive- und passive Abnutzung durch Flachfeuerwaffensysteme.

In einem ersten Teil werden vor dem Hintergrund des veränderten Aufgabenspektrums moderner Streitkräfte Vorteile aggregierter und nicht aggregierter Simulationssysteme verglichen und theoretische Ansätze zur Kopplung entsprechender Modelle erläutert.

Im Anschluss daran wird eine Auswahl existierender Aggregationsansätze vorgestellt und ihre Vor- sowie Nachteile dargelegt. Betrachtet werden die bekannten Modelle von Lanchester mit einigen ihrer wichtigsten Erweiterungen, die Verwendung zellulärer Automaten und Markov-Prozesse sowie sogenannte Netzwerke stochastischer Kleingefechte. Als Ergebnis der Betrachtung wird festgestellt, dass diese Ansätze aus bestimmten Gründen in hohem Maß szenarabhängig sind und deshalb die geforderte Flexibilität in der Abbildung und Verarbeitung wechselnder militärischer Szenarien nicht erbringen können.

Aufgrund dieser Feststellung wird im zweiten Teil der Arbeit das „Leitschützenprinzip“ als neuer, alternativer Aggregationsansatz vorgestellt. Dieser fasst Gruppen homogener Einzelsysteme in aggregierten Gefechtselementen zusammen und bildet die elementaren Gefechtsprozesse mit Hilfe geringfügig modifizierter Algorithmen nicht aggregierter Modelle ab. Auf eine Verwendung aggregierter Modellparameter wird im Rahmen des Leitschützenprinzips bewusst verzichtet, da diese in den vorgestellten herkömmlichen Aggregationsansätzen als Ursache für die festgestellte Szenarabhängigkeit identifiziert werden können.

Am Beispiel des neu entwickelten Experimentalsystems SAMBA¹ wird eine prototypische Umsetzung des Leitschützenprinzips für das Flachfeuergefecht von Infanteriekräften vorgestellt und anschließend im Rahmen einer Vielzahl unterschiedlicher Szenarien systematisch das Rechenzeitverhalten sowie die Abbildungsgüte des Ansatzes untersucht.

Die Ergebnisse dieser Rechenexperimente zeigen, dass das Leitschützenprinzip grundsätzlich in der Lage ist, bei deutlich verbessertem Rechenzeitverhalten eine flexible Aggregation zu ermöglichen. Bei sinnvoller Bildung der aggregierten Gefechtselemente kommt es zu keinen signifikanten Verfälschungen, so dass Konsistenz zwischen den Ergebnissen der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung herrscht. Das Leitschützenprinzip erweist sich somit gegenüber bisherigen Ansätzen als besser geeignet zur aggregierten Abbildung – besonders von Infanteriekräften – in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen.

¹ Simple **A**ttention **M**odel for variably **A**ggregated Forces

INHALTSVERZEICHNIS

ÜBERSICHT	I
INHALTSVERZEICHNIS.....	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XIII
1 EINLEITUNG	1
2 ZUR BEDEUTUNG UND VERWENDUNG VON MODELLBILDUNG UND SIMULATION IN MODERNEN STREITKRÄFTEN	3
2.1 Der Wandel im Aufgabenspektrum der Streitkräfte.....	3
2.1.1 Das alte Aufgabenspektrum zu Zeiten des kalten Krieges.....	3
2.1.2 Das neue Aufgabenspektrum	3
2.2 Modellbildung und Simulation zur Unterstützung im neuen Aufgabenspektrum.....	7
2.2.1 Aufgabenbereiche für M&S im neuen Aufgabenspektrum.....	7
2.2.2 Versuch einer grundlegende Klassifizierung von Simulationssystemen für militärische M&S	9
2.2.3 Anforderungen an militärische M&S vor dem Hintergrund des neuen Aufgabenspektrums.....	11
2.3 Zusammenfassung.....	14
3 ZUR AGGREGATION UND DEAGGREGATION UND IHRER BEDEUTUNG IN GEFECHTSSIMULATIONSSYSTEMEN	15
3.1 Zur Abgrenzung der Begriffe Auflösung, Genauigkeit und Komplexität eines Modells	15
3.1.1 Allgemeines.....	15
3.1.2 Der Begriff der Auflösung	15
3.1.3 Der Begriff der Genauigkeit.....	16
3.1.4 Der Begriff der Komplexität	17
3.2 Zur Bedeutung aggregierter und hochauflösender Gefechtssimulationsmodelle für Analysezwecke	19
3.2.1 Allgemeines.....	19
3.2.2 Zur Bedeutung aggregierter Gefechtssimulationsmodelle.....	19
3.2.3 Zur Bedeutung hochauflösender Gefechtssimulationsmodelle.....	22
3.2.4 Zusammenfassung.....	23
3.3 Zur Kopplung von aggregierten und hochauflösenden Gefechtssimulationsmodellen	24
3.3.1 Allgemeines.....	24
3.3.2 Der Begriff der Konsistenz	25
3.3.3 Der Ansatz des Cross Resolution Modeling (CRM).....	28
3.3.3.1 Allgemeines zum Ansatz des CRM	28

3.3.3.2	Probleme der Aggregation und Deaggregation	28
3.3.3.3	Ansätze zur Aggregation und Deaggregation	32
3.3.3.4	Zusammenfassung	35
3.3.4	Der Ansatz des Variable Resolution Modeling (VRM)	36
3.3.4.1	Allgemeines zum Ansatz des VRM	36
3.3.4.2	Selektive Betrachtung	37
3.3.4.3	Alternative Submodelle	38
3.3.4.4	Integrierte Prozesshierarchien variabler Auflösung	41
3.3.4.5	Zusammenfassung	46
3.3.5	Der Ansatz des Multiple Resolution Modeling (MRM)	47
3.4	Zusammenfassung	48
4	ZUR AGGREGIERTEN ABBILDUNG ELEMENTARER GEFECHTSPROZESSE	49
4.1	Allgemeines	49
4.2	Modellierung von Abnutzungsprozessen mit Lanchestermodellen	51
4.2.1	Die ursprünglichen Modelle von Lanchester	51
4.2.1.1	Das quadratische Gesetz von Lanchester	51
4.2.1.2	Das lineare Gesetz von Lanchester	52
4.2.1.3	Bewertung der ursprünglichen Modelle von Lanchester	55
4.2.2	Erweiterungen der ursprünglichen Modelle von Lanchester	57
4.2.2.1	Der Lanchesteransatz für heterogene Kräfte	57
4.2.2.2	Der Lanchesteransatz mit entfernungsabhängigen Koeffizienten	60
4.2.2.3	Andere Erweiterungen des ursprünglichen Lanchestermodells	62
4.2.3	Ansätze zur Ermittlung von Lanchesterkoeffizienten	64
4.2.4	Abschließende Bewertung	65
4.3	Modellierung von Abnutzungsprozessen mit Markov-Ketten	67
4.3.1	Grundsätzliches zu Markov-Ketten und ihrer Verwendung in Gefechtssimulationssystemen	67
4.3.1.1	Definition eines stochastischen Prozesses	67
4.3.1.2	Definition eines Markov-Prozesses	67
4.3.1.3	Allgemeines zu Markov-Ketten	68
4.3.1.4	Verwendung von Markov-Ketten in Gefechtssimulationssystemen	70
4.3.2	Das Gefechtssimulationssystem HORUS	73
4.3.2.1	Allgemeines	73
4.3.2.2	Das Abnutzungsmodell in HORUS	73
4.3.3	Abschließende Bewertung	78
4.4	Modellierung von Abnutzungsprozessen mit zellulären Automaten	79
4.4.1	Allgemeines	79
4.4.2	Grundsätzliches zu zellulären Automaten	79
4.4.2.1	Das „Game of Life“ von Conway	81
4.4.2.2	Das „Black&White Game of Life“	82
4.4.3	Das Gefechtssimulationssystem ZEGA	83

4.4.3.1	Modellbeschreibung	83
4.4.3.2	Bewertung des Modells	86
4.4.4	Das Gefechtssimulationssystem ZELGAT	87
4.4.4.1	Modellbeschreibung	87
4.4.4.2	Bewertung des Modells	89
4.4.5	Das Gefechtssimulationssystem ISAAC	90
4.4.5.1	Modellbeschreibung	90
4.4.5.2	Bewertung des Modells	93
4.4.6	Abschließende Bewertung	94
4.5	Modellierung von Abnutzungsprozessen mit Netzwerken stochastischer Kleingefechte.....	96
4.5.1	Beschreibung des Ansatzes	96
4.5.2	Abschließende Bewertung	98
4.6	Zusammenfassung	99
5	DAS LEITSCHÜTZENPRINZIP ALS ANSATZ ZUR AGGREGIERTEN ABBILDUNG ELEMENTARER GEFECHTSPROZESSE.....	101
5.1	Allgemeines	101
5.1.1	Der allgemeine Ansatz	101
5.1.2	Bildung der aggregierten Elemente	103
5.1.3	Zeitliche Taktung der aggregierten Elemente	105
5.1.4	Abbildung elementarer Gefechtsprozesse	107
5.1.4.1	Grundlegende Annahmen	107
5.1.4.2	Zielaufklärung beim Leitschützenprinzip	107
5.1.4.3	Aktive Abnutzung beim Leitschützenprinzip	111
5.1.4.4	Bewegung beim Leitschützenprinzip	114
5.2	Mögliche Vorteile des Leitschützenprinzips	116
5.3	Problemfelder und Grenzen der Anwendung des Leitschützenprinzips	120
5.3.1	Ausgewählte Maßgrößen für die Bewertung des Leitschützenprinzips	120
5.3.2	Problem asymmetrischer Mächtigkeiten	122
5.3.3	Problem des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen	124
5.4	Zusammenfassung	127
6	DAS GEFECHTSSIMULATIONSSYSTEM SAMBA.....	129
6.1	Modellbeschreibung	129
6.1.1	Allgemeines zu SAMBA	129
6.1.2	Geländeabbildung	129
6.1.3	Abbildung der Gefechtsobjekte	131
6.1.4	Abbildung des Abnutzungsprozesses	133
6.1.4.1	Gliederung des Abnutzungsprozesses	133
6.1.4.2	Zielaufklärung	133
6.1.4.3	Zielauswahl	138
6.1.4.4	Feuerallokation	142

6.1.4.5	Trefferermittlung.....	144
6.1.4.6	Ermittlung der erzielten Wirkung	146
6.1.5	Abbildung der Bewegung von Gefechtselementen.....	147
6.1.5.1	Berechnung des optimalen Weges	147
6.1.5.2	Bewegung von teilweise niedergehaltenen Gefechtselementen.....	150
6.2	Feststellen des Endes eines Simulationslaufes	154
6.3	Protokollierung und Auswertung in SAMBA	155
6.3.1	Allgemeine Daten.....	155
6.3.2	Detailprotokoll eines Simulationslaufs	157
7	UNTERSUCHUNGEN MIT DEM MODELL SAMBA.....	159
7.1	Allgemeine Systematik der Versuchsreihen	159
7.2	Versuchsreihe I - Grundlegende Untersuchungen.....	162
7.2.1	Beschreibung des verwendeten Szenars und der Versuchsdurchführung.....	162
7.2.2	Bezeichnung der Grundszenarvarianten in der Versuchsreihe I	166
7.2.3	Bewertung des Rechenzeitverhaltens.....	167
7.2.4	Konsistenzbewertung bezüglich der Gewinnhäufigkeit.....	172
7.2.5	Konsistenzbewertung bezüglich der Gefechtsdauer	173
7.2.5.1	Grundsätzliche Aussagen	173
7.2.5.2	Analyse der Auswirkungen des Feuerkoordinierungsgrades.....	173
7.2.5.3	Analyse der Auswirkungen der Gefechtsdistanz und der Aggregationsstufe.....	175
7.2.5.4	Analyse der Auswirkungen der Treffwahrscheinlichkeit.....	181
7.2.5.5	Zusammenfassung.....	182
7.2.6	Konsistenzbewertung bezüglich der Endstärke.....	183
7.2.6.1	Grundsätzliche Aussagen	183
7.2.6.2	Analyse der Auswirkungen der Treffwahrscheinlichkeit.....	183
7.2.6.3	Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe und des Feuerkoordinierungsgrades	185
7.2.6.4	Zusammenfassung.....	186
7.2.7	Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs	187
7.2.7.1	Grundsätzliche Aussagen	187
7.2.7.2	Analyse der Auswirkungen der Gefechtsdistanz	187
7.2.7.3	Analyse der Auswirkungen der Treffwahrscheinlichkeit.....	192
7.2.7.4	Analyse der Auswirkungen des Feuerkoordinierungsgrades.....	196
7.2.7.5	Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe.....	199
7.2.7.6	Zusammenfassung.....	204
7.2.8	Zusammenfassung zu den Ergebnissen der Versuchsreihe I	205
7.3	Versuchsreihe II - Untersuchungen zu dem Problemfeld der asymmetrischen Mächtigkeiten	206
7.3.1	Beschreibung des verwendeten Szenars und der Versuchsdurchführung.....	206
7.3.2	Bezeichnung der Grundszenarvarianten in der Versuchsreihe II.....	208
7.3.3	Bewertung des Rechenzeitverhaltens.....	209

7.3.4	Konsistenzbewertung bezüglich der Gewinnhäufigkeit.....	210
7.3.4.1	Grundsätzliche Aussagen	210
7.3.4.2	Analyse der Auswirkungen der Gefechtsdistanz	211
7.3.4.3	Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe und der Treffwahrscheinlichkeit	212
7.3.4.4	Zusammenfassung.....	216
7.3.5	Konsistenzbewertung bezüglich der Gefechtsdauer und Endstärke	217
7.3.6	Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs	219
7.3.7	Zusammenfassung zu den Ergebnissen der Versuchsreihe II	222
7.4	Versuchsreihe III - Untersuchungen zum Problemfeld des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen.....	224
7.4.1	Beschreibung des verwendeten Szenars und der Versuchsdurchführung.....	224
7.4.2	Bezeichnung der Grundszenarvarianten in der Versuchsreihe III.....	229
7.4.3	Bewertung des Rechenzeitverhaltens.....	230
7.4.4	Konsistenzbewertung bezüglich der Gewinnhäufigkeit.....	231
7.4.5	Konsistenzbewertung bezüglich der Gefechtsdauer	231
7.4.6	Konsistenzbewertung bezüglich der Endstärke.....	232
7.4.6.1	Grundsätzliche Aussagen	232
7.4.6.2	Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe, der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit sowie der Sichtbereichsgruppengröße	232
7.4.6.3	Zusammenfassung.....	237
7.4.7	Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs	238
7.4.8	Zusammenfassung zu den Ergebnissen der Versuchsreihe III.....	241
7.5	Abschließende Bewertung der Ergebnisse aller Versuchsreihen	242
8	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNGEN	245
ANHANG A	– VERLUSTBEWERTUNG BEI STEILFEUERBESCHUSS BEIM LEITSCHÜTZENPRINZIP.....	249
ANHANG B	– DETAILPROTOKOLL EINES SAMBA SIMULATIONS-LAUFES....	253
ANHANG C	– VORSCHLAG ZUR BESTIMMUNG DER SICHTKONTAKTWAHRSCHEINLICHKEITEN IM MODELL SAMBA	259
ANHANG D	– TABELLARISCHE AUFLISTUNG DER ERGEBNISSE DER VERSUCHSREIHEN I-III.....	263
	Ergebnisse der Versuchsreihe I	263
	Ergebnisse der Versuchsreihe II.....	269
	Ergebnisse der Versuchsreihe III	272
LITERATURVERZEICHNIS		281
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....		287
INDEX.....		289

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 3.1:	<i>Auflösung, Genauigkeit und Komplexität</i>	18
Abb. 3.2:	<i>Mögliche Aggregationsstufen analog zu militärischen Hierarchieebenen</i>	21
Abb. 3.3:	<i>Schwache und starke Konsistenz (herkömmliche Sichtweise)</i>	25
Abb. 3.4:	<i>Schwache und starke Konsistenz (verbesserte Sichtweise)</i>	27
Abb. 3.5:	<i>Kettendeaggregation</i>	29
Abb. 3.6:	<i>Inkonsistenz in der Abbildung</i>	30
Abb. 3.7:	<i>Auflösungsoszillation</i>	31
Abb. 3.8:	<i>Vollständige Deaggregation mit Kettendeaggregation</i>	32
Abb. 3.9:	<i>Partielle Deaggregation</i>	33
Abb. 3.10:	<i>Räumliche Deaggregationsbereiche</i>	34
Abb. 3.11:	<i>Pseudo-Deaggregation</i>	35
Abb. 3.12:	<i>Modell mit selektiver Betrachtung</i>	38
Abb. 3.13:	<i>Alternative Submodelle unterschiedlicher Auflösung</i>	40
Abb. 3.14:	<i>Prozesshierarchie Schadenserwartung (Beispiel)</i>	42
Abb. 3.15:	<i>Seiteneffekte in Prozesshierarchien</i>	44
Abb. 3.16:	<i>Prozesshierarchien und objektorientierte Programmierung</i>	45
Abb. 3.17:	<i>Multiple Resolution Entity</i>	47
Abb. 4.1:	<i>Heterogener Lanchesteransatz</i>	59
Abb. 4.2:	<i>Lanchesteransatz mit Abbildung von Bewegung</i>	61
Abb. 4.3:	<i>Quadratischer Lanchesteransatz mit Unterstützungsfeuer</i>	62
Abb. 4.4:	<i>Zustandsübergangsgraph einer Markov-Kette</i>	69
Abb. 4.5:	<i>Verlauf Siegwahrscheinlichkeiten (Beispiel)</i>	72
Abb. 4.6:	<i>Sensitivitätsbereich eines Elementes (HORUS)</i>	74
Abb. 4.7:	<i>Bekämpfungsphase eines Gefechts (HORUS)</i>	77
Abb. 4.8:	<i>Nachbarschaftsbeziehungen in zellulären Automaten</i>	80
Abb. 4.10:	<i>Black&White Game of Life</i>	82
Abb. 4.11:	<i>Ausgangslage (ZEGA)</i>	84
Abb. 4.12:	<i>Verlauf der linearen bzw. quadratischen Feuerwirkung (ZELGAT)</i>	89
Abb. 4.13:	<i>Nachbarschaftsbeziehungen eines Agenten (ISAAC)</i>	92
Abb. 4.14:	<i>Netzwerk stochastischer Kleingefechte</i>	97
Abb. 5.1:	<i>Aggregation durch Verwendung des Leitschützenprinzips</i>	102
Abb. 5.2:	<i>Taktung eines aggregierten Gefechtselementes</i>	106
Abb. 5.3:	<i>Fiktive Position eines aggregierten Gefechtselementes</i>	108
Abb. 5.4:	<i>Dislozierungsschablonen für aggregierte Gefechtselemente</i>	109
Abb. 5.5:	<i>Ansätze zur Entdeckung im Leitschützenprinzips</i>	110
Abb. 5.6:	<i>Zielauswahl nach geometrischen Kriterien</i>	112
Abb. 5.7:	<i>Überbewertung von Sichtmöglichkeiten</i>	125
Abb. 6.1:	<i>Überprüfen einer Sichtverbindung</i>	135
Abb. 6.2:	<i>Verlauf der Entdeckungswahrscheinlichkeit</i>	137
Abb. 6.3:	<i>Dauer eines Aufklärungsvorgangs</i>	138
Abb. 6.4:	<i>Zielauswahl (SAMBA)</i>	141
Abb. 6.5:	<i>Grundfälle der Feuerallokation (SAMBA)</i>	144
Abb. 6.6:	<i>Wegeoptimierung (SAMBA)</i>	149
Abb. 6.7:	<i>Geschwindigkeitsklassen (SAMBA)</i>	152
Abb. 6.8:	<i>Kräfteverlauf Blau/Rot (Beispiel)</i>	157
Abb. 7.1:	<i>Prüfung auf starke Konsistenz (Schema)</i>	160
Abb. 7.2:	<i>Daten eines Einzelsystems Typ Schütze</i>	162

Abb. 7.3:	<i>Anzahl, Mächtigkeit und räumliche Dislozierung der Kräfte im Grundszenar</i>	164
Abb. 7.4:	<i>Dreistufige Variation der Kampfentfernung</i>	164
Abb. 7.5:	<i>Variationen des Grundszenars (Versuchsreihe I)</i>	165
Abb. 7.6:	<i>Rechenzeit pro Simulationslauf Variantengruppe x-y-25-0</i>	167
Abb. 7.7:	<i>Rechenzeit pro Simulationslauf Variantengruppe x-y-50-0</i>	168
Abb. 7.8:	<i>Rechenzeit pro Simulationslauf Variantengruppe x-y-75-0</i>	168
Abb. 7.9:	<i>Prozentuale Rechenzeit pro Simulationslauf in Abhängigkeit von der Treffwahrscheinlichkeit</i>	170
Abb. 7.10:	<i>Prozentuale Rechenzeit pro Simulationslauf in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe</i>	171
Abb. 7.11:	<i>Erwartungswert der Gefechtsdauer in Abhängigkeit vom Feuerkoordinierungsgrad; Variantengruppen x-100-25-y, x-100-75-y</i>	174
Abb. 7.12:	<i>Standardabweichung der Gefechtsdauer in Abhängigkeit vom Feuerkoordinierungsgrad; Variantengruppen x-100-25-y, x-100-75-y</i>	174
Abb. 7.13:	<i>Erwartungswert der Gefechtsdauer; Variantengruppe 1-x-y-0</i>	175
Abb. 7.14:	<i>Modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung</i>	176
Abb. 7.15:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Gefechtsdauer; Variantengruppe x-y-25-0</i>	179
Abb. 7.16:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Gefechtsdauer; Variantengruppe x-y-50-0</i>	179
Abb. 7.17:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Gefechtsdauer; Variantengruppe x-y-75-0</i>	180
Abb. 7.18:	<i>Wahrscheinlichkeit eines aggregierten Gefechtselementes ein Einzelsystem zu entdecken (in Abhängigkeit von Gefechtsdistanz und Mächtigkeit)</i>	180
Abb. 7.19:	<i>Abnahme der Gefechtsdauer bei steigender Treffwahrscheinlichkeit; Variantengruppe x-100-y-0</i>	181
Abb. 7.20:	<i>Abnahme der Gefechtsdauer bei steigender Treffwahrscheinlichkeit; Variantengruppe x-100-y-100</i>	182
Abb. 7.21:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Treffwahrscheinlichkeit; Variantengruppe x-100-y-0</i>	184
Abb. 7.22:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Treffwahrscheinlichkeit; Variantengruppe x-1000-y-0</i>	184
Abb. 7.23:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe; Variantengruppe x-100-25-y</i>	185
Abb. 7.24:	<i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe; Variantengruppe x-1000-75-y</i>	186
Abb. 7.25:	<i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 2-x-50-0</i>	189
Abb. 7.26:	<i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 2-x-75-0</i>	189
Abb. 7.27:	<i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 2-x-25-0</i>	190
Abb. 7.28:	<i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 6-x-75-0</i>	190
Abb. 7.29:	<i>Verlauf Kräftestandardabweichung; Variantengruppe 2-x-25-0</i>	191
Abb. 7.30:	<i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe 2-x-75-0</i>	191
Abb. 7.31:	<i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 1-100-x-0</i>	193
Abb. 7.32:	<i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 1-1000-x-0</i>	193
Abb. 7.33:	<i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe 1-100-x-0</i>	194

Abb. 7.34: <i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe 1-1000-x-0</i>	194
Abb. 7.35: <i>Differenz Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen x-100-25-0, x-100-50-0</i>	195
Abb. 7.36: <i>Differenz Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen x-1000-25-0, x-1000-50-0</i>	195
Abb. 7.37: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 6-1000-50-x</i>	197
Abb. 7.38: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 3-100-75-x</i>	197
Abb. 7.39: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe 6-100-25-x</i>	198
Abb. 7.40: <i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe 6-100-75-x</i>	198
Abb. 7.41: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe x-100-25-0</i>	199
Abb. 7.42: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe x-500-50-0</i>	200
Abb. 7.43: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppe x-1000-75-0</i>	200
Abb. 7.44: <i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe x-100-25-0</i>	201
Abb. 7.45: <i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe x-500-50-0</i>	201
Abb. 7.46: <i>Verlauf Kräftestandardabweichungen; Variantengruppe x-1000-75-0</i>	202
Abb. 7.47: <i>Differenz Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1-100-25-0, x-100-25-0</i>	202
Abb. 7.48: <i>Differenz Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1-100-50-0, x-100-50-0</i>	203
Abb. 7.49: <i>Differenz Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1-100-75-0, x-100-75-0</i>	203
Abb. 7.50: <i>Variationen des Grundszenars (Versuchsreihe II)</i>	207
Abb. 7.51: <i>Rechenzeit pro Simulationslauf; Variantengruppen 1/x-y-25-0</i>	209
Abb. 7.52: <i>Prozentuale Rechenzeit pro Simulationslauf; Variantengruppen 1/x-y-25-0</i> ...	210
Abb. 7.53: <i>Veränderung der Gewinnhäufigkeit in Abhängigkeit von der Gefechtsdistanz; Variantengruppen 1/2-x-25-0, 2/3-x-25-0, 3/4-x-25-0</i>	212
Abb. 7.54: <i>Gewinnhäufigkeit Blau/Rot; Variantengruppen 2/x-500-25-0, 2/x-500-75-0</i> ...	213
Abb. 7.55: <i>Gewinnhäufigkeit Blau/Rot; Variantengruppen 1/x-100-25-0, 1/x-100-75-0</i> ...	213
Abb. 7.56: <i>Auszug aus einem Detailprotokoll; Variantengruppen 1/2-100-25-0</i>	215
Abb. 7.57: <i>Gewinnhäufigkeit Blau/Rot bei modifizierter Zielauswahlvorschrift; Variantengruppen 1/x-100-75-0</i>	216
Abb. 7.58: <i>Erwartungswert Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe Rot; Variantengruppen 2/x-100-y-0</i>	217
Abb. 7.59: <i>Erwartungswert Gefechtsdauer in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe Rot; Variantengruppen 2/x-100-y-0</i>	218
Abb. 7.60: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1/1-100-25-0, 1/2-100-25-0</i>	219
Abb. 7.61: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1/1-100-25-0, 1/6-100-25-0</i>	220
Abb. 7.62: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1/1-100-25-0, 2/3-100-25-0</i>	221
Abb. 7.63: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen 1/1-100-75-0, 2/3-100-75-0</i>	221
Abb. 7.64: <i>Varianten des Grundszenars (Versuchsreihe III)</i>	228
Abb. 7.65: <i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei; Variantengruppen x-100-75-0-10-1, x-100-0-30-1, x-100-75-0-50-1</i> ...	233
Abb. 7.66: <i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei; Variantengruppen x-100-75-0-70-1, x-100-75-90-1</i>	233
Abb. 7.67: <i>Erwartungswert und Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei; Variantengruppen x-100-75-0-10-y</i>	234

Abb. 7.68: <i>Verlauf Erwartungswert EW_{LOS} in Abhängigkeit von Sichtkontaktwahrscheinlichkeit und Aggregationsstufe</i>	235
Abb. 7.69: <i>Erwartungswert Endstärke der siegreichen Partei und analytisch bestimmte untere Grenze; Variantengruppen x-100-75-0-70-1</i>	236
Abb. 7.70: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen x-100-75-0-70-1</i>	239
Abb. 7.71: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen x-100-75-0-90-1</i>	240
Abb. 7.72: <i>Verlauf Kräfteerwartungswerte; Variantengruppen x-100-75-0-10-8</i>	240
Abb. A.0.1: <i>Verlauf Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz zum Einschlagpunkt (Beispiel)</i>	252
Abb. B.0.1: <i>Auszug aus einem Detailprotokoll (SAMBA)</i>	257
Abb. C.0.1: <i>Bestimmung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit</i>	260

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1: <i>Taxonomie für Simulationssysteme</i>	9
Tab. 4.1: <i>Modelle mit Lanchesteransatz</i>	51
Tab. 4.2: <i>Übergangsmatrix einer Markov-Kette</i>	68
Tab. 4.3: <i>Mögliche Systemzustände (Beispiel)</i>	70
Tab. 4.4: <i>Zustandsübergangsmatrix (Beispiel)</i>	71
Tab. 7.1: <i>Kombinationen der Aggregationsstufen Blau/Rot (Versuchsreihe II)</i>	206
Tab. 7.2: <i>Sichtverbindungsmatrix 1 (Versuchsreihe III)</i>	226
Tab. 7.3: <i>Sichtverbindungsmatrix 2 (Versuchsreihe III)</i>	227

1 EINLEITUNG

Die veränderte sicherheitspolitische Lage in der Welt seit Ende des Kalten Krieges hat zu einer deutlichen Verschiebung im Spektrum der möglichen militärischen Einsatzszenarien geführt. Frühere Landes- oder Bündnisverteidigungsszenarien, deren wahrscheinliche Rahmenbedingungen über einen längeren Zeitraum Bestand hatten, verlieren zusehends an Bedeutung. An ihre Stelle treten vor allem kleinere Krisenszenarien mit oft geringen Vorwarnzeiten, welche sich durch eine große Bandbreite möglicher geographischer, ethnologischer, politischer und militärischer Ausprägungen auszeichnen. Die daraus resultierende Vielzahl denkbarer Einsatzszenarien verlangt von modernen Streitkräften ein gesteigertes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit im Rahmen der Ausbildung und Einsatzvorbereitung sowie der Einsatzdurchführung und –nachbereitung.

Diese Flexibilität ist grundsätzlich jedoch nur durch geeignete technische Unterstützungsmaßnahmen zu erreichen, zu denen sicherlich auch die Bereitstellung adäquater Hilfsmittel der Modellbildung und Simulation (M&S) zählt. Der gegenüber klassischen Kriegsszenarien bezüglich der Menge des eingesetzten militärischen Materials und Personals zumeist deutlich geringere Umfang moderner Krisenszenarien sowie die häufig gegebene Notwendigkeit zum Einsatz hochmobiler Kleingruppen und den entsprechenden Taktiken, führt dabei dazu, dass gerade bei Gefechtssimulationssystemen eine gesteigerte Anforderung zur detaillierteren Abbildung festzustellen ist.

Derartige hochauflösende Gefechtssimulationssysteme als ein Teilgebiet möglicher M&S-Hilfsmittel im militärischen Bereich müssen deshalb in der Lage sein, wechselnde Szenarien und Einsatzgrundsätze schnell und flexibel abzubilden und zu verarbeiten. Im Rahmen solcher Systeme finden jedoch aus einer Vielzahl von Gründen Verfahren zur Aggregation Anwendung, welche besonders die Abbildung der individuellen Gefechtsobjekte sowie ihrer elementaren Prozesse *Zielaufklärung*, *passive und aktive Abnutzung* sowie *Bewegung* betreffen. Zu den wohl bekanntesten dieser Aggregationsverfahren sind dabei die Modelle von Lancaster und deren Erweiterungen, die Verwendung der Theorie der Markov-Prozesse sowie Modelle auf Basis zellulärer Automaten zu zählen.

Die Verwendung von Aggregationsverfahren hat sich in der Vergangenheit jedoch als problematisch erwiesen, da diese neben der stets notwendigen Szenarbeschreibung zusätzlich auf spezielle aggregierte Eingabedaten angewiesen sind, bei welchen es sich um reine Modellgrößen handelt. Diese aggregierten Modellparameter finden in der militärischen Realität keine direkt messbaren Entsprechungen, so dass sie durch analytische Überlegungen oder den Einsatz nicht aggregierter hochauflösender Gefechtssimulationssysteme bestimmt werden müssen. Von diesen aggregierten Modellparametern lässt sich zusätzlich zumeist zeigen, dass sie in hohem Maße von den spezifischen Daten des jeweils betrachteten Szenars abhängen. Bei einer selbst geringfügigen Veränderung bzw. bei einem Wechsel des betrachteten Szenars ist deshalb eine (aufwendige) Neukalibrierung des jeweiligen Aggregationsverfahrens in Form einer Neubestimmung der aggregierten Modellparameter notwendig. Da eine solche Neukalibrierung jedoch tendenziell zeitaufwendig ist, lässt dies den sinnvollen Einsatz solcher Aggregationsverfahren bei einem breiten und häufig wechselnden Einsatzspektrum zumindest fraglich erscheinen.

Vor diesem Hintergrund ist der Inhalt der vorliegenden Arbeit der Entwurf sowie die prototypische Umsetzung eines als „**Leitschützenprinzip**“ bezeichneten neuen Ansatzes zur Aggregation in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen. Dieser verzichtet (weitgehend) auf die Verwendung aggregierter Modellparameter und nutzt für die Abbildung der elementaren

Gefechtsprozesse nur geringfügig veränderte Algorithmen nicht aggregierter hochauflösender Gefechtssimulationssysteme.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich dabei folgendermaßen:

- Im Anschluss an diese Einleitung wird in Kapitel 2 dieser Arbeit das veränderte Aufgabenspektrum moderner Streitkräfte und die daraus resultierenden Anforderungen an Hilfsmittel der Modellbildung und Simulation beschrieben.
- Kapitel 3 diskutiert – im Anschluss an eine Klärung zentraler Begriffe, wie etwa Auflösung, Genauigkeit, Komplexität und Konsistenz – Vor- und Nachteile aggregierter und nicht aggregierter Abbildung und stellt eine Auswahl grundsätzlicher theoretischer Ansätze zur Kopplung von aggregierten und nicht aggregierten Modellen vor.
- Kapitel 4 erläutert bisher verwendete Aggregationsverfahren, ihre jeweilige Vorgehensweise sowie dabei aufgetretene Probleme. Betrachtet werden dazu vor allem die Modelle von Lanchester sowie eine Auswahl ihrer wichtigsten Erweiterungen, die Theorie der Markov-Prozesse und Modelle auf Basis zellulärer Automaten. Soweit möglich wird in diesem Rahmen zusätzlich eine Umsetzung der jeweiligen Verfahren in existierenden Gefechtssimulationssystemen vorgestellt.
- Kapitel 5 und 6 erläutern danach zunächst theoretisch den grundsätzlichen Ansatz des „Leitschützenprinzips“ und seine erwarteten Vorteile bzw. Grenzen sowie daran anschließend eine erste Umsetzung im Rahmen des prototypischen Gefechtssimulationssystems SAMBA².
- In Kapitel 7 werden dann eine Reihe von Untersuchungen und deren Ergebnisse vorgestellt, welche mit SAMBA zu einer systematischen Bewertung der Güte der aggregierten Abbildung mit Hilfe des „Leitschützenprinzips“ durchgeführt wurden.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse sowie einigen Schlussbemerkungen zu möglichen Erweiterungen und Anschlussarbeiten in Kapitel 8.

² Simple **A**ttention **M**odel for variably **A**ggregated Forces

2 ZUR BEDEUTUNG UND VERWENDUNG VON MODELLBILDUNG UND SIMULATION IN MODERNEN STREITKRÄFTEN

2.1 Der Wandel im Aufgabenspektrum der Streitkräfte

2.1.1 Das alte Aufgabenspektrum zu Zeiten des kalten Krieges

Die sicherheitspolitische Lage ist seit Ende des Kalten Krieges und dem damit verbundenen kontinuierlichen Übergang von einer bipolaren zur einer multipolaren Weltordnung einem stetigen Wandel unterworfen. Während der Phase des kalten Krieges stand für die Streitkräfte demokratischer westlicher Staaten vor allem die Vorbereitung auf Aufgaben der Landes- und Bündnisverteidigung im Zentrum der Planungs- und Ausbildungsbemühungen. Das Szenario eines Ost-West-Konfliktes, welches die Grundlage dieser Bemühungen bildete, zeichnete sich durch ein hohes Maß an Kontinuität aus, da seine wichtigsten Beschreibungsgrößen, wie etwa das angenommene Feindbild, das vermutete Austragungsgebiet, Art und Umfang des Konfliktes sowie die beabsichtigte eigene Strategie, über längere Zeit Bestand hatten. Für die in ein Verteidigungsbündnis eingebetteten Streitkräfte bedeutete dies, dass Ausrüstungs- und Ausbildungsbemühungen gezielt und langfristig auf die angenommene Einsatzart ausgerichtet werden konnten. Anwendungen der Modellbildung und Simulation (M&S) sollten dabei die Streitkräfte vorwiegend bei Ausbildungsvorhaben sowie im Rahmen der militärischen Systemanalyse bei Beschaffung von Wehrmaterial und Einsatzplanung unterstützen. Für die Entwickler dieser M&S-Hilfsmittel bedeutete die angesprochene Kontinuität in der Szenarbeschreibung die Vorgabe von relativ eindeutig definierten Rahmenbedingungen, Zielen und Bewertungsmaßstäben für den Modellbildungs- und Implementierungsprozess, welche über einen längeren Zeitraum Gültigkeit besaßen.³ Die entstandenen Modelle konnten sich deshalb damit begnügen, die vorgegebenen Rahmenbedingungen abzubilden und damit die systematische Ausbildung bzw. Analyse zur Erreichung der definierten Ziele zu unterstützen. Eine möglichst flexible und umfassende Abbildung unscharf definierter und weit von einander abweichender Szenarien wurde nicht gefordert und Mangels Bedarf auf Seiten der Streitkräfte von den Entwicklern auch nicht unterstützt.

2.1.2 Das neue Aufgabenspektrum

Nach Ende des Kalten Krieges liegt der Kernauftrag der Streitkräfte zwar nominell weiterhin auf dem Gebiet der Landes- bzw. Bündnisverteidigung,⁴ die Bandbreite der real wahrgenommenen Aufgaben verlagert sich aber zunehmend auf Einsätze im Rahmen des sogenannten erweiterten Aufgabenspektrums, d.h. der friedenserhaltenden und friedensschaffenden – sogenannten *Operations other than War* (OOTW) – in Ausnahmefällen auch friedens erzwingenden Maßnahmen. In der im April 1999 in Washington D.C. verabschiedeten Erklärung „*The Alliance’s Strategic Concept*“⁵ formulierten die teilnehmenden Staatschefs des Nordatlantischen Bündnisses dies folgendermaßen:

The Alliance will maintain the necessary military capabilities to accomplish the full range of NATO’s missions. ... the combined military forces of the Alliance must be capable of deterring any potential aggression against it, of stopping an aggressor’s advance as far forward as possible should an attack nevertheless occur. ... They

³ vgl. [Huber et al. 2002], S. 6f

⁴ Für die Bundesrepublik Deutschland vgl. etwa [Grundgesetz 95], Artikel 87a

⁵ vgl. [NATO 99], Punkt 41

must also be prepared to contribute to conflict prevention and to conduct non-Article 5 crisis response operations.

Neben dem weiterhin erstgenannten Kernauftrag der Bündnisverteidigung werden hier explizit auch Einsatzformen des erweiterten Aufgabenspektrums genannt, auf deren Durchführung die Streitkräfte der Bündnisstaaten durch Ausrüstung und Ausbildung vorbereitet sein müssen. Die Formulierung spiegelt dabei die aktuelle sicherheitspolitische Lage des NATO-Bündnisses wieder, in welcher das Eintreten eines umfangreichen Bündnisverteidigungsszenars theoretisch zwar denkbar ist, mittelfristig jedoch als unwahrscheinlich bewertet werden muss. Die Wahrung der Sicherheitsinteressen der Bündnisstaaten findet deshalb mit zunehmender Häufigkeit in Form der zweitgenannten Einsätze des erweiterten Aufgabenspektrums statt. Solche Krisenpräventions- oder Krisenbewältigungsmaßnahmen sollen dazu dienen, die internationale Sicherheitslage zu stabilisieren und das Überspringen lokaler Krisen und Konflikte auf Gebiete zu verhindern, welche für die Interessen der Bündnisstaaten von Belang sind. Dieses Umdenken in Bezug auf das wahrscheinlichste Einsatzspektrum findet zunehmend auch in die militärischen Planung der einzelnen Staaten Eingang. Die 1999 durch den damaligen Generalinspekteur der Bundeswehr erlassene „Operative Leitlinie zum Einsatz der Streitkräfte“ identifiziert in diesem Zusammenhang die folgenden fünf Teilbereiche des zukünftigen erweiterten Aufgabenspektrums deutscher Streitkräfte im Bündnisrahmen:⁶

1. **Landes- und Bündnisverteidigung:** Dieser – immer noch als Kernauftrag der Bundeswehr betrachtete – Teilbereich beschreibt die Aufgabe der kollektiven Verteidigung, d.h. der Landesverteidigung im Bündnisrahmen einerseits sowie der Unterstützung von Bündnispartnern andererseits. Ziel dieser Form militärischer Einsätze ist die Wahrung bzw. Wiederherstellung politischer Handlungsfreiheit bzw. der Integrität des Bündnisgebietes und erfordert somit die Fähigkeit, Streitkräfte in einem multinationalen Verbund über größere Entfernungen zum Heimatland vor allem an den Grenzen des Bündnisgebietes und damit auch außerhalb Zentraleuropas einsetzen zu können.
2. **Krisenreaktion** (außerhalb Zentraleuropas): Dieser Teilbereich beschreibt das Mitwirken an militärischen Aktionen, die im Rahmen des Bündnisses als Reaktion auf Krisen durchgeführt werden, um damit unmittelbare Bedrohungen abzuwenden, welche aus diesen Krisen für das gesamte Bündnis bzw. für einzelne Bündnispartnern entstehen könnten.
3. **Krisenbewältigung:** Hierunter sind militärische Beiträge zur Konfliktverhütung und Krisenbewältigung zu verstehen, die im Rahmen von internationalen Friedensmissionen zur Beilegung von solchen Krisen dienen sollen, welche sich nicht oder nur mittelbar auf das Bündnisgebiet der NATO auswirken können.
4. **Rettungs- und Evakuierungseinsätze im Ausland:** Bei diesen Einsätzen handelt es sich um zumeist beschränkte militärische Aktionen. Diese dienen dazu, im Ausland in Not geratene Bundesbürger zu schützen und aus der jeweiligen Notlage zu befreien. Das Spektrum der hier denkbaren Einsätze reicht von der Evakuierung aus Umweltkatastrophengebieten mit Transportmitteln der Streitkräfte bis hin zu Geiselnbefreiungsaktionen unter Anwendung von militärischer Gewalt.
5. **Hilfeleistung in Katastrophenfällen:** Hierbei wird militärisches Material und Personal durch die Streitkräfte zur Hilfeleistung bei Naturkatastrophen und besonders schweren

⁶ vgl. [BMVg 1999]

Unglücksfällen im Inland sowie zur Unterstützung humanitärer Hilfsaktionen auch außerhalb des Bündnisgebietes eingesetzt.

Die im Dezember 2000 neu erlassene Heeresdienstvorschrift (HDv) 100/100 der deutschen Streitkräfte ergänzt diese Aufzählung möglicher Aufgaben abschließend noch um den Teilbereich:⁷

6. **Krisenverhinderung** durch glaubwürdige Abschreckung und Wahrung der Stabilität.

Die Teilnahme an der Durchführung von Einsätzen des erweiterten Aufgabenspektrums und hierbei insbesondere von OOTW erfordert aufgrund der spezifischen Bedingungen und Anforderungen dieser Einsatzformen eine Neuformulierung des geforderten Fähigkeitsprofils von Streitkräften. Dabei lassen sich insbesondere die beiden folgenden identifizieren:

- Die Fähigkeit auch über längere Zeiträume mobil, flexibel einsetzbar, überlebens- und durchsetzungsfähig zu sein.
- Die Fähigkeit im Rahmen eigener Einsätze und bei Einsätzen im Bündnis auch in kurzfristigen multinationalen Koalitionen erfolgreich agieren zu können.

Gegenüber bisherigen Beschreibungen des notwendigen Fähigkeitsprofils der Streitkräfte tritt hier besonders der Aspekt der kurzfristigen und mobilen Einsatzfähigkeit in das Zentrum der Betrachtungen. Zusammen mit der Forderung nach Befähigung zur Einsatzführung in multinationalen Koalitionen – wobei im Gegensatz zu bisherigen Landes- und Bündnisverteidigungsszenarien die vorstellbare Zahl und Art der beteiligten Nationalitäten grundsätzlich deutlich steigt und zusätzlich von Einsatz zu Einsatz variieren kann – führt dies zu der Feststellung, dass OOTW sehr spezifische Anforderungen an moderne militärische Strukturen und Fähigkeiten stellen. Diese müssen nicht identisch sein mit herkömmlichen Forderungen, abgeleitet aus dem reinen Verteidigungsauftrag, können deren Komplexität aber durchaus erreichen. Der ehemalige Generalinspekteur der Bundeswehr General Hans-Peter von Kirchbach bemerkt dazu in seinem Eckwertepapier zur zukünftigen Struktur der deutschen Streitkräfte vom 23. Mai 2000:

*Krisenmanagement und Konfliktverhütung stellen spezifische und zusätzliche Anforderungen an militärische Fähigkeiten. Komplexe Krisenoperationen können aber hinsichtlich der Anforderungen denen der Kollektiven Verteidigung durchaus vergleichbar sein.*⁸

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, fordert von Kirchbach weiter:

*Dazu sind Streitkräfte erforderlich, ... die bei Ausbildung, Übungen und im Einsatz den Anforderungen von Multinationalität und streitkräftegemeinsamen Operationen gerecht werden, insbesondere im Hinblick auf Führungsorganisation und –mittel sowie Mobilität, Flexibilität und Interoperabilität ...*⁹

Für eine Beurteilung der veränderten Anforderungen an Streitkräften ist es somit wichtig festzuhalten, dass das genannte neue Aufgabenspektrum eine enorme Zahl denkbarer und auch möglicher Einsätze gerade im Rahmen von OOTW Szenarien mit einer großen Bandbreite

⁷ vgl. [HDv 100/100]

⁸ vgl. [von Kirchbach 2000], Abschnitt 1.1, Absatz 14

⁹ vgl. [von Kirchbach 2000], Abschnitt 2.6

unterschiedlichster ethnischer, militärischer und geographischer Gegebenheiten enthält. Die im Bereich der Landes- und Bündnisverteidigung existierende Kontinuität im gegebenen Einsatzszenar existiert dabei offensichtlich nicht, so dass an Struktur, Ausrüstung und Ausbildung der Streitkräfte neue Anforderungen gestellt werden müssen. Das weitgefächerte und zudem oft nur kurzfristig absehbare Einsatzspektrum erfordert deshalb in besonderem Maße Flexibilität bei den verantwortlichen militärischen Führern und dem militärischen Personal auf allen Hierarchieebenen sowohl während der Durchführung und Nachbereitung als auch bereits bei der Vorbereitung dieser Operationen sowie die Fähigkeit zur (technischen) Zusammenarbeit in multinationalen Streitkräfteverbänden wechselnder Zusammensetzung und Größe. Diese geforderte Flexibilität und Interoperabilität ist ohne moderne und sehr flexible Führungsmittel – zu denen auch Hilfsmittel der Modellbildung und Simulation zu rechnen sind – vermutlich nicht zu erreichen.

2.2 Modellbildung und Simulation zur Unterstützung im neuen Aufgabenspektrum

2.2.1 Aufgabenbereiche für M&S im neuen Aufgabenspektrum

Bei dem Versuch der Streitkräfte die geforderte Flexibilität in Struktur und Einsatzfähigkeit zu erreichen, kommt der intensiven Unterstützung durch leistungsfähige und bedarfsgerechte M&S-Hilfsmittel für Strukturuntersuchungen, Training und Einsatzvor- und -nachbereitung sowie der Bereitstellung von Einsatzunterstützungssystemen zur Unterstützung und Entlastung militärischer Führer während einer laufenden Operation eine zentrale Bedeutung zu. Die unterschiedlichen Aufgabenfelder, welche durch Modellbildung und Simulation in den Streitkräften abgedeckt werden sollen, umfassen dabei unter anderem:¹⁰

- die Unterstützung der Ausbildung einzelner Soldaten, militärischer Einheiten oder Führer im Rahmen von Übungen und Einsatzvorbereitungen,
- die Bewertung taktischer Verhaltenweisen oder neuer Waffensysteme,
- die Analyse und Bewertung möglicher Streitkräftestrukturen sowie
- die Einsatzunterstützung.

Abgedeckt werden diese Aufgabenfelder durch ein breites Spektrum bereits existierender bzw. in der Entwicklung befindlicher Systeme aus dem Bereich der Modellbildung und Simulation. Die Bandbreite der dabei eingesetzten Modelle reicht von Entwicklungen für logistische und organisatorische Aufgaben über Simulatoren zur Ausbildung des Personals in der Bedienung und dem taktischen Einsatz einzelner Waffensysteme oder im Verbund einer Einheit bis hin zu hoch und höchst auflösenden Gefechtssimulationsmodellen zur detaillierten Abbildung des Gefechts der verbundenen Waffen und spezieller Einsatzszenarien für OOTW.

Gerade Gefechtssimulationsmodelle mit unterschiedlichem Detaillierungs- und Auflösungsgrad werden dabei eingesetzt zur Analyse und Planung als geschlossene Systeme, d.h. ohne Benutzereingaben während eines Simulationslaufes, sowie für die Ausbildung des militärischen Führungspersonals als offene Systeme, d.h. mit steuerndem Einfluss eines oder mehrerer Bediener.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Zahl real stattfindender internationaler Einsätze im Rahmen von Krisenbewältigungsaufgaben gewinnt offensichtlich auch im Bereich der militärischen M&S das Aufgabenfeld der Einsatzunterstützung zunehmend an Bedeutung. Das eigens verfasste *Rahmenkonzept der Bundeswehr zur Operations Research Unterstützung im Einsatz (ORUstgEins)* trägt dieser Tatsache Rechnung und führt dazu aus:

Es [Das Rahmenkonzept - Anm. des Autors] dient dem Zweck, die Führungsleistung der militärischen Führer und ihrer Stäbe in allen Führungsgrundgebieten und auf allen Führungsebenen im Führungsprozess in Lagezentren, auf Gefechtsständen sowie in Gefechtsstands- und Führungsfahrzeugen mit Hilfe von OR-Methoden zu verbessern und damit Führungsüberlegenheit zu schaffen.

¹⁰ vgl. etwa [BMVg 2002], „Grundsätze für Modellbildung und Simulation in der Bundeswehr“

Da derartiger Einsätze zumeist als zeitkritisch zu bewerten sind, d.h. bei Vorbereitung und Durchführung eine möglichst schnelle Reaktion von dem betroffenen militärischen Personal verlangt wird, soll die Unterstützung der militärischen Führer durch Methoden des Operations Research (OR) – damit natürlich auch durch M&S-Hilfsmittel – diese vorrangig in die Lage versetzen, vorhandene Informationen schneller und umfangreicher verarbeiten, analysieren und schlussendlich in Entscheidungen umsetzen zu können. Betrachtet man die Phasen der Durchführung eines Einsatzes, so lässt sich aufzeigen, dass geeignete M&S-Hilfsmittel in jeder einzelnen Verwendung finden können:

1. **Vorbereitung des Einsatzes:** M&S-Hilfsmittel können während dieser Phase das militärische Personal unter anderem unterstützen im Rahmen der Festlegung des für den jeweiligen Einsatz geforderten personellen und materiellen Fähigkeitsprofils, der Auswahl konkreter Einsatzkontingente, der Herstellung der Einsatzbereitschaft des Kontingents durch Unterstützung in der vorbereitenden Ausbildung sowie im Rahmen der Planung und Durchführung der Verlegung in das Einsatzgebiet.
2. **Einsatzdurchführung:** Während der Einsatzdurchführung ist ebenfalls eine Vielzahl möglicher Gebiete für Methoden und Anwendungen der M&S denkbar, welche neben Fragen der Stationierungsplanung und Herstellung der Überlebensfähigkeit im Einsatzland vor allem die Planung und Durchführung der für die Erfüllung des Einsatzzieles notwendigen Einzeloperationen sowie die Bewertung von Handlungsentscheidungen zur Entscheidungsunterstützung umfassen.
3. **Einsatzabschluss und –nachbereitung:** Auch im Rahmen dieser Durchführungsphase ist sowohl bei Planung und Realisierung der Rückverlegung, als auch bei der sich anschließenden notwendigen Nachbereitung und Auswertung des durchgeführten Einsatzes eine Unterstützung durch M&S-Mittel möglich und auch sinnvoll, um die dabei anfallenden Datenmengen und Fragestellungen in angemessener Zeit verarbeiten zu können.

In der Phase der eigentlichen Einsatzdurchführung kann offensichtlich damit gerechnet werden, in einem kurzen zeitlichen Rahmen auf neue Informationen über Veränderungen in der bisher gegebenen Lage reagieren zu müssen. Die denkbaren Veränderungen können dabei von neuen infrastrukturellen Details, wie etwa dem Vorhandensein oder dem Wegfall von Wegen oder Brücken, bis hin zu einer neuen politischen Situation im Einsatzland reichen. In Einsätzen, in denen es zu Kampfhandlungen kommt, können sie daneben vor allem auch neue Informationen über Zustand, Fähigkeiten und (vermutete) Absicht der feindlichen Partei betreffen. Je nach Art und Reichweite der Auswirkungen der jeweiligen Veränderungen bedürfen diese augenscheinlich unterschiedlicher Reaktionen auf verschiedenen Hierarchieebenen der militärischen Führungsorganisation. Eine adäquate M&S-Unterstützung muss somit ebenfalls in der Lage sein, eine große und nicht immer vorhersehbare Menge von Problemen in angemessener Zeit durch militärische Führer mit unterschiedlich detaillierten Interessengebieten anhand vorhandener Informationen analysieren zu lassen und diesen damit eine Grundlage für ihre Führungstätigkeit zu geben. An M&S-Hilfsmittel für diese Phase der Einsatzdurchführung sind deshalb besonders hohe Flexibilitätsanforderungen zu stellen.

2.2.2 Versuch einer grundlegende Klassifizierung von Simulationssystemen für militärische M&S

Betrachtet man das bereits genannte Spektrum denkbarer M&S-Hilfsmittel, welche die beschriebenen Aufgabenbereiche im Rahmen der Streitkräfte erfüllen sollen, so lassen sich diese anhand einer verbreiteten Taxonomie¹¹ (vgl. Tabelle 2.1) in die folgenden grundlegenden Gruppen von Simulationsanwendungen einordnen:

- (a) Live Simulationen (*LSIM*)
- (b) Virtuelle Simulationen (*VSIM* = *virtual simulation*)
- (c) Konstruktive Simulationen (*CSIM* = *constructive simulation*)

Unter **Live Simulationen** sind hier all diejenigen Simulationen zu verstehen, in denen reale Personen mit realen Systemen arbeiten. Im militärischen Bereich gelten Manöver als klassisches Beispiel für diese Kategorie. Der Vorteil dieser Simulationen liegt in der hohen Realitätsnähe und dem daraus resultierenden guten Ausbildungseffekt für die beteiligten Soldaten. Einschlägige Sicherheits- und Umweltschutzvorschriften sowie Kostenüberlegungen können den Einsatz von LSIM für etliche Ausbildungsgebiete jedoch erschweren bzw. gänzlich verhindern.

In die Klasse der **Virtuellen Simulationen** werden dagegen diejenigen Simulationen eingeordnet, in welchen reale Personen mit virtuellen (simulierten) Systemen in einer virtuellen Realität arbeiten und üben. Zu den Simulationssystemen dieser Klasse gehören im militärischen Bereich vor allem Flug- und Fahrzeugsimulatoren aber auch moderne Handwaffensimulatoren, wie etwa das System AGSHP¹². Diese Simulationen versprechen gegenüber realen Systemen ein zumeist kostengünstigeres und umweltschonenderes Üben. Sie haben zudem den Vorteil, dem Benutzer eine szenarspezifische Vorbereitung und Ausbildung etwa durch die Verwendung entsprechender geographischer Daten zu erlauben. Dies ist mit realen Systemen im Vorgriff auf einen Krisen- oder Kriegseinsatz außerhalb des Heimatlandes oder Bündnisgebietes zumeist nicht möglich.

Die Gruppe der **Konstruktiven Simulationen** schließlich umfasst Simulationen, in welchen virtuelle Personen mit virtuellen Systemen arbeiten, d.h. solche, in denen sowohl die bedienenden Soldaten als auch die von ihnen eingesetzten Waffensysteme in einer virtuellen Realität – heutzutage vorzugsweise durch Computersysteme – abgebildet werden. Simulationen dieser Gruppe eignen sich einerseits in Form offener Simulationssysteme zur Ausbildung militärischer Führer – wobei die unterstellten Truppen, feindlichen Kräfte und das Gefechtsgeschehen virtuell dargestellt werden – sowie andererseits als geschlossene Simulationssysteme zur systematischen Analyse und Bewertung taktischer Ansätze, neuer Waffensysteme oder Streitkräftestrukturen.

Kategorie	Personen	Systeme/Umwelt
Live Simulation	Real	Real
Virtuelle Simulationen	Real	Virtuell
Konstruktive Simulationen	Virtuell	Virtuell

Tabelle 2.1: Eine einfache Taxonomie zur Einordnung von Simulationen

¹¹ vgl. etwa [USDOD 95], „Modeling and Simulation Master Plan“, Definition 36

¹² *Ausbildungssimulator für Hand- und Panzerabwehrwaffen* = AGSHP

Vor dem Hintergrund des vorgestellten Spektrums möglicher M&S-Anwendungen im militärischen Bereich wird schnell deutlich, dass diese Taxonomie nur einen groben und zumeist unzureichenden Versuch zur Kategorisierung darstellen kann. Gerade bezüglich des Virtualisierungsgrades der handelnden Personen ist eine Vielzahl von Mischformen denkbar, in denen sowohl virtuelle als auch reale Personen in Simulationen (gleichberechtigt) agieren können. Gerade als offene Modelle ausgelegte Gefechtssimulationssysteme, in welchen eine zunehmend an Intelligenz gewinnende Feinddarstellung – sogenannte computergenerierte Kräfte¹³ – mit den realen Personen der Modellbediener in einer virtuellen Umwelt interagiert, verdeutlichen das Problem.¹⁴ Verändert man die Definition der Kategorien dieser Taxonomie geeignet, so kann sie trotzdem weiterhin als sinnvoller Ansatz für eine erste Grobklassifizierung von Simulationen dienen. Für die Definition der Klasse der Live Simulationen ist eine Änderung dabei nicht notwendig, da diese bereits relativ eindeutig erfolgt ist. Die Klassen der virtuellen und konstruktiven Simulationen bedürfen zur schärferen Abgrenzung jedoch einer Erweiterung der jeweiligen Definition um zumindest einen weiteren Aspekt.

Die Kritik an der bisherigen Taxonomie betrifft vor allem die ungenaue Berücksichtigung des Virtualisierungsgrades der handelnden Personen. Es liegt deshalb nahe, bei einer vorgeschlagenen Verbesserung diesen Aspekt in das Zentrum der Definition zu stellen und zusätzlich die Motivation einer realen bzw. virtuellen Abbildung der beteiligten Personen zu betrachten.

Vor diesem Hintergrund sollen als **virtuelle Simulationen** dann all die Simulationen gelten, in welchen reale Personen mit virtuellen Systemen agieren, die Simulation jedoch darauf ausgelegt ist, dies die handelnden Personen durch eine möglichst authentische Wiedergabe der virtuellen Umwelt vergessen zu lassen. Diese Gruppe von Simulationen begreift beteiligte reale Personen als integralen Teil der abgebildeten Umwelt und hat das wesentliche Ziel, den realen Personen den Eindruck zu vermitteln, mit realen Systemen in einer realen Umwelt zu agieren. In diesem Rahmen abgebildete virtuelle Personen – z.B. eine Feinddarstellung in Schießsimulatoren – dienen dazu, dieses Ziel der Verschleierung der Virtualisierung zu erreichen und besitzen keinen darüber hinausgehenden eigenen Zweck. Als **konstruktive Simulationen** können in Abgrenzung dazu diejenigen Simulationen kategorisiert werden, in denen primär virtuelle Personen mit virtuellen Systemen agieren und reale Personen nur organisatorische Funktionen und solche der Simulationsbedienung übernehmen. Virtuelle Personen dieser Kategorie besitzen einen eigenen Zweck, der über die Verschleierung der Visualisierung für einen Bediener hinausgeht. Sie können eine wesentliche Größe im jeweiligen Untersuchungsfeld darstellen, in deren Abhängigkeit zum Beispiel die Auswirkung neuer Taktiken auf die Überlebensfähigkeit von Streitkräften oder aber auch selbstorganisierende Prozesse in Kampfgemeinschaften betrachtet werden.

Die so modifizierte Taxonomie beseitigt offensichtlich ein gewisses Maß der ursprünglichen Unschärfe in der Klassifizierung von Simulationen. Mit Hinblick auf das weite Spektrum möglicher Simulationsanwendungen kann es sich jedoch auch hier nur um einen groben Versuch der Klassifizierung handeln. Kriterien für eine feinere Differenzierung gerade der Gruppe der Gefechtssimulationssysteme werden deshalb mit den Begriffen der Auflösung, der Aggregation und der Detailtreue im anschließenden Kapitel 3 vorgestellt.

¹³ Im Englischen als *Computer Generated Forces (CGF)* bezeichnet.

¹⁴ Im Rahmen dieser Taxonomie noch gänzlich unberücksichtigt bleiben solche Simulationen, in denen virtuelle Personen mit realen Systemen agieren. Da solche Simulationen im Bereich des militärischen M&S bisher jedoch nach Kenntnis des Autors nur wenig Anwendungen, z.B. im Bereich der Neuentwicklungen von Waffensystemen, gefunden haben, wird auf eine eingehendere Diskussion dieser Problematik hier verzichtet.

2.2.3 Anforderungen an militärische M&S vor dem Hintergrund des neuen Aufgabenspektrums

An M&S-Hilfsmittel werden durch die Streitkräfte spezifische Forderungen gestellt, welche sich aus militärischen und politischen Gegebenheiten und Absichten sowie besonders auch aus der bereits beschriebenen neuen Vielfältigkeit im Spektrum der möglichen Einsatzszenarien ableiten lassen. Diese umfassen

1. die Forderung nach möglichst geringen Kosten für Entwicklung, Wartung und Betrieb der Modelle,
2. die Forderung nach möglichst geringem Aufwand für die Ausbildung der militärischen Bediener und Nutzer,
3. die Forderung nach einer flexible Eingabe und Verarbeitung von in Bezug auf Art, Umfang und militärischem bzw. geographischem Umfeld unterschiedlichen Szenarien,
4. die Forderung nach der Fähigkeit zur Kopplung nationaler Modelle mit internationalen Modellen und Systemen der Streitkräfte anderer Bündnisstaaten oder Koalitionspartnern,
5. die Forderung nach einer Möglichkeit zum standardisierten Datenaustausch zwischen Modellen auch unterschiedlicher Detaillierungsebenen,
6. die Forderung nach der Entwicklung von M&S-Hilfsmitteln, welche verteilte Modellierung und Simulation in auch heterogenen Netzwerkstrukturen ermöglichen sowie
7. die Forderung nach der grundsätzlichen Möglichkeit, die jeweiligen Modelle und Systeme einem VV&A Prozess¹⁵ zu unterwerfen, d.h. sie zu validieren, verifizieren und akkreditieren.

Die letzte Forderung ist gerade bezüglich des Anwendungsgebietes der Einsatzunterstützung für Modelle von zentraler Bedeutung, welche für Vor-, Nachbereitung und Durchführung von Krisen- und Kriegseinsätzen genutzt werden sollen. Während bei der Verwendung von Modellen zur Ausbildung und Analyse eine Verifikation¹⁶ und Validierung¹⁷ der jeweiligen Entwicklungen zumeist zwar wünschenswert nicht jedoch zwingend notwendig ist, müssen diese Aktivitäten für den Bereich der Einsatzunterstützungssysteme stets durchgeführt werden. Gerade für Modelle, welche den militärischen Führer bei der konkreten Durchführung eines Einsatzes – etwa im Rahmen der Lagefeststellung oder Planung – unterstützen, kann von einer Forderung nach Verifikation und Validierung keinesfalls abgewichen werden, da hier fehlerhafte bzw. ungenaue Modelle und Systeme im schlimmsten Fall in einem Verlust von Menschenleben resultieren können.

Die Forderungen nach Möglichkeiten zur verteilten Simulation in (heterogenen) Netzwerken, nach Möglichkeiten zum Datenaustausch zwischen verschiedenen Modellen sowie zur Kopplung multinationaler Systeme führen dazu, dass bei der (Weiter-)Entwicklung von Modellen

¹⁵ Eine umfassende Beschreibung der Methoden zur Verifizierung, Validierung und Akkreditierung im M&S Bereich enthält z.B. [Lehmann et al. 2002].

¹⁶ Unter *Verifikation* versteht man im Bereich der M&S den Prozess der Prüfung, ob eine Implementierung die Spezifikationen und Beschreibungen des jeweiligen Modells korrekt umsetzt.

¹⁷ Unter *Validierung* versteht man im Bereich der M&S den Prozess der Prüfung, zu welchem Grad ein Modell den jeweils betrachteten Ausschnitt der Wirklichkeit wiedergibt.

nationale und besonders internationale Standardisierungsbestrebungen zu berücksichtigen sind. Diese können sowohl die technischen, als auch syntaktische oder semantische Probleme der Modellierung und Simulation betreffen.¹⁸

Technisch und syntaktisch orientierte Standardisierungsbemühungen legen primär fest, in welcher Form Modelle untereinander aber auch mit ihrer Umwelt Daten bzw. Anweisungen austauschen können. Sie beschäftigen sich dazu mit der Definition von Schnittstellen- und Kommunikationsstandards sowie mit der Vorgabe eindeutiger Datenbeschreibungsmodelle. Es wird damit sowohl der Aspekt der technischen Realisierung als auch das Format des Inhalts einer Kommunikation berücksichtigt. Auf dem Gebiet der militärischen M&S gilt vor allem die *High Level Architecture (HLA)*¹⁹ – spätestens seit ihrer Autorisierung im Jahr 1996 als vorgeschriebene technische Standardarchitektur für alle Simulationssysteme des amerikanischen Verteidigungsministeriums – als anerkannter Standard zur Strukturierung und Organisation der Kommunikation in verteilten Simulationssystemen. International kann daneben aber auch der kommerziellen *Common Object Request Broker Architecture (CORBA)* aufgrund ihrer weiten Verbreitung und ihres fortgeschrittenen Entwicklungsgrades eine Bedeutung für Teilbereiche des M&S nicht abgesprochen werden.²⁰ In dem Bereich der Datenmodellbeschreibungsstandards schließlich sollte vor allem das *Army Tactical Command and Control Information System (ATCCIS)* bzw. das *Land Command and Control Information Exchange Data Model (LC2IEDM)* als NATO-weit standardisierte Version genannt werden.²¹ Der Standard des ATCCIS/LC2IEDM-Datenmodells beschreibt alle für den Datenaustausch zwischen ATCCIS/LC2IEDM-konformen Modellen relevante Daten sowie ihre Beziehungen untereinander. Sowohl HLA und CORBA als auch der ATCCIS/LC2IEDM-Standard betreffen technische und auch syntaktische Bereiche der Standardisierung,²² wobei der Begriff der Syntax sich in diesem Zusammenhang auf die Ebene der Beschreibung des Modellgegenstandes, d.h. der militärischen Realität, bezieht. Daneben existieren weitere Standardisierungsbestrebungen, welche sich mit der Syntax der technischen Ebene, d.h. mit der Normierung von Datenpaketen, Transportprotokollen und ähnlichem beschäftigen.

Semantisch orientierte Standardisierungsbestrebungen im Bereich der militärischen M&S beschäftigen sich mit der Bedeutung bzw. Interpretation der übertragenen Daten. Hierbei ist durch Standardisierung zu klären, was Modelle unter einem übertragenen Begriff verstehen sollen, um dadurch eine einheitliche Verarbeitung zu erreichen. Solche Standards versuchen sich aus nachvollziehbaren Gründen möglichst nah an dem in einschlägigen Vorschriften festgelegten militärischen Sprachgebrauch zu orientieren. Da dieser zumeist jedoch eine gewisse Unschärfe besitzt, bleiben eigenständige und über die Vorschriftenlage hinausgehende Standardisierungsbemühungen zum Austausch von Daten und Anweisungen in der M&S notwendig. Im Bereich des US Heeres und Marineinfanteriekorps wurde 1999 mit der *Battle Management Language Level 1 (BML 1)*²³ ein erster Ansatz für einen semantischen Standard geschaffen.

¹⁸ [Hofmann et al. 2001] weisen darauf hin, dass Standardisierung in der M&S neben Technik, Syntax und Semantik auch den Aspekt der Pragmatik betreffen kann. Auf eine Beschreibung dieses Teilaspektes wird hier jedoch verzichtet, da nach Kenntnis des Autors bisher keine Bemühungen zur Standardisierung auf diesem Gebiet vorangetrieben wurden und einheitliche Vorstellungen dazu noch ausstehen.

¹⁹ Eine grundlegende Beschreibung der HLA kann z.B. [USDOD 98] entnommen werden.

²⁰ Eine Diskussion der Vor- und Nachteile der Ansätze HLA und CORBA enthält z.B. [Davis, Moeller 99]

²¹ vgl. [Nato 2000]

²² Es muss festgehalten werden, dass ATCCIS/LC2IEDM neben den technischen und syntaktischen bereits auch semantische Aspekte betrifft und damit auch den semantisch orientierten Standardisierungsbemühungen zugeordnet werden kann.

²³ vgl. [MSRR1]

Eine abschließende Betrachtung der ersten zwei genannten Forderungen an M&S-Hilfsmittel führt zu der Erkenntnis, dass zukünftige Modell- und Systementwicklungen in verstärktem Maße auf bereits existierende Produkte zurückgreifen müssen, wobei durchaus auch handelsübliche kommerzielle Entwicklungen (COTS)²⁴ eine denkbare Alternative darstellen. Neben der Wiederverwendung kompletter Modelle stellen wiederum vor allem Methoden zur Standardisierung und komponentenbasierten Entwicklung mögliche Lösungsansätze dar, mit deren Hilfe die zumeist hohen Kosten sowie der große Zeitbedarf kompletter Neuentwicklungen durch die Wiederverwendung bereits existierender Module älterer Modelle vermieden werden können. Die Wiederverwendung existierender Modelle oder Modellkomponenten kann zudem wie gefordert dazu beitragen, denn Ausbildungsaufwand für das Bedienpersonal der jeweiligen Modelle zu reduzieren, indem z.B. modellübergreifend einheitliche Benutzeroberflächen, Daten- oder Szenarbeschreibungen existieren.

²⁴ Comercial of the shelf = COTS

2.3 Zusammenfassung

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das de facto wahrgenommene Aufgabenspektrum moderner Streitkräfte sich zunehmend auf das Gebiet der Krisenverhinderung und Krisenbewältigung verlagert. Diese Einsatzarten zeichnen sich gegenüber dem herkömmlichen Auftrag der Landes- und Bündnisverteidigung durch eine mangelnde Kontinuität in der Szenarbeschreibung aus. Einsätze im Rahmen des erweiterten Aufgabenspektrums reichen von der Wahrnehmung ordnungspolizeilicher Aufgaben bis hin zu kriegsähnlichen Maßnahmen und können neben Art und Austragungsort vor allem auch in dem jeweiligen ethnischen und politischen Umfeld variieren. Die damit gegebene Vielfalt im möglichen Einsatzspektrum verbunden mit oftmals kurzen Einsatzplanungs- und Einsatzvorbereitungszeiten verlangt neben der Schaffung geeigneter flexibler und mobiler militärischer Strukturen und Ausstattungsmittel besonders von dem betroffenen militärischen Personal ein erhöhtes Maß an kurzfristigem und an das jeweilige Szenar angepasstem Organisations- und Führungsvermögen.

Vor diesem Hintergrund besteht die Aufgabe der militärischen Modellbildung und Simulation darin, die Streitkräfte mit adäquaten und flexiblen Modellen und Systemen zu versorgen, welche dazu beitragen können, die Organisations- und Führungsleistung auf allen Ebenen der militärischen Hierarchie zu verbessern. M&S-Hilfsmitteln zur Einsatzunterstützung kommt dabei eine zentrale Rolle zu, da vor dem Hintergrund real stattfindender Einsätze in zumeist multinationalen Koalitionen an sie besonders hohe Maßstäbe bezüglich Zuverlässigkeit, Flexibilität und insbesondere Interoperabilität mit den Systemen anderer Nationalitäten zu stellen sind. Diesen Anforderungen kann nur durch die konsequente Entwicklung und Verwendung geeigneter Standards auf der technischen, syntaktischen und semantischen Ebene der M&S sowie durch angepasste Aktivitäten der Validierung, Verifizierung und Akkreditierung entsprochen werden.

Gerade Gefechtssimulationssysteme (GSS) als Teil des Spektrums möglicher M&S-Entwicklungen können in diesem Zusammenhang in vielfacher Art und Weise Anwendung finden. Mögliche Einsatzgebiete reichen von der Verwendung als offene Systeme zur Aus- und Weiterbildung des militärischen Personals sowie zur Einsatzvorbereitung der jeweiligen Führer, über die Verwendung zur Beurteilung neuer Waffensysteme oder Einsatztaktiken, bis hin zu einer Anwendung als entscheidungsunterstützende Systeme²⁵ im Rahmen eines laufenden Einsatzes. Die dabei verwendeten GSS bedürfen vor allem der Fähigkeit in kurzer Zeit verschiedenste Szenarien vor dem Hintergrund vorgegebener Problem- und Fragestellungen zu verarbeiten, welche in Bezug auf das betroffenen Teilgebiet bzw. die Detaillierung der jeweils notwendigen Betrachtung deutlich variieren können. An die hier eingesetzten Modelle ist deshalb die Forderung nach einem hohen Maß an Effizienz, Robustheit und problemangepasster Auswertbarkeit zu stellen. Unter Robustheit²⁶ soll dabei in diesem Rahmen verstanden werden, dass die verwendeten Modellierungsansätze der jeweiligen GSS keine Parameter und Abbildungsvorschriften nutzen, welche nur für eine kleine Gruppe von Szenarien Gültigkeit besitzen. Vielmehr müssen diese auch bei einer Veränderung der szenarbeschreibenden Parameter, wie etwa des Geländes oder der beteiligten Parteien und Einsatzgrundsätze, weiter verwendet werden können. Effizienz und problemangepasste Auswertbarkeit schließlich ist offensichtlich unabdingbar, um die geforderte Einsetzbarkeit der M&S im Rahmen eines kurzfristigen und bezüglich des jeweiligen Szenars bzw. der Problemstellung variablen Führungsvorgangs zu gewährleisten.

²⁵ Im Englischen als *Decision Support Tools (DST)* bezeichnet.

²⁶ Eine ausführliche Diskussion der Begriffe Robustheit und Auswertbarkeit im Kontext hochauflösender GSS enthält z.B. [Hofmann M. 2000], S. 224ff

3 ZUR AGGREGATION UND DEAGGREGATION UND IHRER BEDEUTUNG IN GEFECHTSSIMULATIONSSYSTEMEN

3.1 Zur Abgrenzung der Begriffe Auflösung, Genauigkeit und Komplexität eines Modells

3.1.1 Allgemeines

Eine Diskussion der Begriffe Aggregation und Deaggregation²⁷ sowie ihrer Bedeutung in Gefechtssimulationssystemen und bei der Kopplung unterschiedlicher Modelle, macht eine Abgrenzung der Begriffe Auflösung, Genauigkeit und Komplexität eines Modells sowie der Zusammenhänge zwischen diesen drei Größen notwendig.

Die im Folgenden vorgestellten Definitionen erheben keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit, werden von anderen Autoren aber geteilt²⁸ und stellen somit eine geeignete Grundlage für die folgende Darstellung der Aggregations- und Deaggregationsproblematik dar.

3.1.2 Der Begriff der Auflösung

In den einleitenden Betrachtungen zur Bedeutung und Verwendung von Gefechtssimulationssystemen in modernen Streitkräften²⁹ wurde dargelegt, dass das Spektrum der heutzutage verwendeten Modelle von der Klasse der Live Simulationen über Gefechtsübungssimulationssysteme (Virtuelle Simulationen) bis hin zu hochaggregierten Gefechtssimulationssysteme bzw. analytischen Modelle (Konstruktive Simulationen) reicht. Diese einzelnen Modellklassen unterscheiden sich aufgrund des beabsichtigten Einsatzzwecks unter anderem durch die gewählte **Auflösung**, d.h. dem Detaillierungsgrad, mit welchem einzelne Prozesse oder Objekte innerhalb des Gefechtsgeschehens abgebildet werden. Die häufig verwendete begriffliche Unterscheidung einzelner Modelle als hoch- bzw. niedrigauflösend legt dabei den falschen Schluss nahe, dass es sich bei der Auflösung eines Modells um eine eindimensionale, d.h. für alle abgebildeten Prozesse und Objekttypen einheitliche Größe handelt. Dies ist in der Regel aber nicht der Fall. Vielmehr kann und wird innerhalb eines Modells der Detaillierungsgrad der Abbildung, d.h. die gewählte Auflösung, von Prozess zu Prozess bzw. Objekttyp zu Objekttyp variieren. Es ist damit durchaus möglich, dass einzelne Prozesse in einem Modell hochauflösend, andere, z.B. für den beabsichtigten Einsatzzweck des Modells weniger relevante Prozesse, dagegen nur mit einer niedrigen Auflösung abgebildet werden.³⁰ Davon unbelassen bleibt selbstverständlich jedoch die Tatsache, dass die Auflösung miteinander eng verzahnter Prozesse oder Objektmodelle aufeinander abgestimmt sein muss, um ein sinnvolles Funktionieren des Modells zu ermöglichen. Als „eng verzahnt“ sollen dabei in diesem Zusammenhang solche Prozesse und Objektmodelle gelten, welche für ihre vollständige Model-

²⁷ In der angelsächsischen und deutschen Fachliteratur ist alternativ zu Deaggregation auch der Begriff der Disaggregation gebräuchlich. Der Begriff der Disaggregation vermittelt nach Meinung des Autors jedoch die falsche Vorstellung, dass dieser Vorgang ein reines Zerlegen (dis-, lat.: -auseinander, -zerlegen) bereits vorhandener Sammelobjekte darstellt. Dies ist in der Regel jedoch nicht der Fall, da aggregierte Objekte normalerweise nicht über die vollständigen Informationen ihrer atomaren Elemente verfügen. Der Begriff der Deaggregation (de-, lat.: -herab, -herunter) bezeichnet dagegen korrekt den Vorgang des Herabsetzens des Aggregationsniveaus, ohne Schlüsse über den damit verbundenen Vorgang an sich zu vermitteln.

²⁸ vgl. etwa [Sisti, Farr 98]

²⁹ vgl. Kapitel 2.2, S. 7ff

³⁰ Ein denkbare Beispiel dafür wäre etwa ein Gefechtssimulationsmodell, welches das Abnutzungsverhalten der Gefechtsobjekte mit Hilfe einer Einzelschusssimulation – unter Einbeziehung einer Vielzahl relevanter physikalischer Größen – sehr detailliert, d.h. hochauflösend abbildet, logistische Prozesse, zum Beispiel die Versorgung mit Betriebsstoffen und Munition, aber nur mit einer geringen Auflösung – etwa durch eine konstante Zeitverzögerung im Gefechtsgeschehen – darstellt.

lierung ständig oder zumindest häufig auf die Abbildung des jeweils anderen Prozesses oder Objekts angewiesen sind.³¹

Für die Einteilung in *hoch-* und *niedrigauflösende* Gefechtssimulationsmodelle ist es somit notwendig, die Auflösung relevanter Kernprozesse bzw. Untermodelle des jeweiligen Modells zu betrachten. Dies betrifft im Allgemeinen besonders die folgenden Aspekte:

1. *Geländemodellierung*: Wichtige Maßzahlen für die Bewertung der Auflösung der Geländemodellierung sind zum Beispiel die Größe der kleinsten abgebildeten Höhenunterschiede, die Zahl der abgebildeten Gelände- und Bewuchstypen oder der Flächenumfang einer einzelnen Geländezelle³².
2. *Simulationszeitmodellierung*: Als Auflösung der Modellierung der Simulationszeit kann etwa die Größe des kleinsten möglichen Zeitraums betrachtet werden, welcher zwischen zwei, im Modell zeitlich getrennt abgebildeten Ereignissen liegt.
3. *Modellierung der Gefechtsobjekte*: Die Auflösung der Modellierung der Gefechtsobjekte ergibt sich aus der kleinsten im Modell explizit abgebildete militärischen Hierarchieebene³³ sowie dem Umfang, in dem physikalische Kenngrößen und Prozesse einzelner Objekte dargestellt und bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Zusätzlich dazu gewinnt besonders die Auflösung der Modellierung von *Kommunikations- und Führungsprozessen* an Bedeutung, da in der militärischen Realität deren Einfluss auf das Geschehen vor dem Hintergrund der wachsenden Komplexität des modernen Gefechts der verbundenen Waffen ebenfalls zunimmt. Kommunikations- und Führungsprozesse können somit als eng verzahnt mit herkömmlichen Kernprozessen und –modellen gelten und sollten deshalb in modernen Gefechtssimulationsmodellen ebenfalls mit einer adäquaten Auflösung dargestellt werden.

3.1.3 Der Begriff der Genauigkeit

Von dem Begriff der Auflösung zu unterscheiden ist die **Genauigkeit** eines Modells. Unter Modellgenauigkeit wird verstanden, wie „gut“ ein Modell die Wirklichkeit abbildet, d.h. wie exakt die Modellergebnisse mit der realen Welt übereinstimmen.³⁴ Die benötigte Genauigkeit eines Modells hängt selbstverständlich eng mit dem beabsichtigten Verwendungszweck des Modells zusammen.³⁵ Sie stellt im Rahmen des Modellentwicklungsprozesses eine wesentliche Kenngröße dar, da gerade die notwendige Auflösung von der jeweils gewünschten Genauigkeit abhängt.

³¹ Es würde zum Beispiel keinen Sinn ergeben, innerhalb eines Modells Gefechtsobjekte und ihre Aktionen bis auf Einzelfahrzeugebene abzubilden und gleichzeitig das Gelände durch Quadrate mit einer Kantenlänge von mehr als 200 Metern zu modellieren. Ein, im Verhältnis zur gewählten Objektauflösung derart grob gerastertes Gelände würde eine adäquate Abbildung der Bewegungs-, Aufklärungs- und Bekämpfungsprozesse einzelner Fahrzeuge nicht ermöglichen.

³² Etwa bei Rasterung des digitalen Gefechtsfeldes in Quadrate oder Sechsecke.

³³ Etwa Einzelfahrzeug, Zug, Kompanie, usw.

³⁴ Bei Modellen aus dem Bereich der Mechanik oder Physik kann darunter zum Beispiel verstanden werden, welche Messgenauigkeit ([kg], [g], [mg], etc.) das Modell abbildet.

³⁵ Bei einem Gefechtsmodell, welches als Einsatzunterstützungssystem Verwendung findet, wird man – aufgrund der real existierenden Risiken für Leib und Leben der betroffenen Soldaten deutlich höhere Forderungen an die Modellgenauigkeit stellen müssen, als bei einem Gefechtssimulationssystem zur reinen taktischen Weiterbildung militärischer Führer.

Die Genauigkeit kann im Rahmen der Validierung des Modells überprüft und gegebenenfalls quantifiziert werden. Der enorme Umfang moderner Gefechtssimulationsmodelle mit einer großen Zahl simulierter Objekte, das nach wie vor nur rudimentär vorhandene Verständnis über menschliche Verhaltensweisen in Gefechtssituationen³⁶ sowie die mit einem hohen Maß an Unsicherheit behaftete stochastische Natur des Gefechtsgeschehens macht die rein mathematisch-logische Validierung eines solchen Modells jedoch praktisch unmöglich.³⁷ Als sinnvolle Vorgehensweisen bei der Modellvalidierung haben sich deshalb unter anderem folgende Methoden erwiesen:

- *Vergleich der Ergebnisse empirischer Tests* (Übungen) oder der *Auswertung historischer Gefechte* mit den Simulationsergebnissen des Modells.
- Systematische Untersuchung des Einflusses relevanter Eingabedaten auf die Simulationsergebnisse, in Form einer *Sensitivitätsanalyse*.
- Überprüfung der Simulationsergebnisse des Modells durch *Expertenbefragungen*.

Um die Begriffe Modellauflösung und –genauigkeit korrekt voneinander abzugrenzen, ist es ferner notwendig festzuhalten, dass eine gesteigerte Modellauflösung nicht zwangsläufig eine höhere Genauigkeit zur Folge hat (vgl. Abbildung 3.1). Die Steigerung der Auflösung der Gefechtsobjekte, d.h. zum Beispiel die zusätzliche Abbildung weiterer physikalischer Daten eines Fahrzeugs, wird etwa nur dann zu einer Steigerung der Modellgenauigkeit führen, wenn diese Daten für den jeweiligen Prozess relevant sind, welcher mit Hilfe des Modells untersucht wird. Weiterhin kann eine Steigerung der Auflösung eines Untermodells grundsätzlich nur dann zu einer Erhöhung der Modellgenauigkeit führen, wenn mit ihm verzahnte andere Untermodelle und Prozesse bereits über eine entsprechende Auflösung verfügen bzw. diese gegebenenfalls analog erhöht wird.

3.1.4 Der Begriff der Komplexität

Der Begriff der **Komplexität** eines Modells soll hier in Anlehnung an die Komplexitätstheorie³⁸ als Maß für den Rechenaufwand – etwa in Form der Zahl notwendiger Rechenschritte – verstanden werden, welcher mit der Ausführung des Programmcodes des jeweiligen Modells verbunden ist. Die Begriffe der Auflösung und Komplexität eines Modells stehen somit in enger Verbindung, da ein erhöhter Detaillierungsgrad eines Modells normalerweise auch eine erhöhte Komplexität zur Folge haben wird. Durch die bereits angesprochene Verzahnung wesentlicher Kernprozesse untereinander bzw. mit den Modellen der Gefechtsobjekte, führt die Erhöhung des Detaillierungsgrades eines Prozesses bzw. Objektmodells zumeist notwendigerweise zu einer Erhöhung der verzahnten Prozesse bzw. Objektmodelle, so dass auch hier ein zusätzlicher Komplexitätszuwachs zu erwarten ist.

Betrachtet man dagegen das Verhältnis von Komplexität und Genauigkeit, so lässt sich ein analoger Schluss nicht per se ziehen, d.h. eine erhöhte Komplexität hat nicht zwangsläufig einen gesteigerten Detaillierungsgrad zur Folge. [Sisti, Farr 98] erläutern diesen Zusammenhang an folgendem einfachen Beispiel:

³⁶ Immer noch unklare Aspekte des menschlichen Verhaltens in Gefechtssituationen umfassen etwa Fragen nach dem Verhalten niedergehaltener Einheiten, dem Verhalten bei hohen Verlusten oder den exakten Auswirkungen von Stress, Müdigkeit bzw. Hunger auf das Leistungsniveau der Soldaten.

³⁷ Eine Diskussion der spezifischen Probleme, Grenzen und Möglichkeiten bei der Validierung von Gefechtssimulationssystemen enthält zum Beispiel [Hofmann M., Pötzsch 2001].

³⁸ vgl. etwa [Calude 88] oder [Börger 85]

...if we have a detailed model of a six-sided cube being thrown, and our intent is to determine which of its six sides lands face up, we know that it can be replaced with a random draw from one to six, with absolutely no loss in accuracy. Essentially, we have reduced the complexity of the model (i.e., those calculations pursuant to its physical rendering, its chaotic trajectory, etc.), while statistically maintaining its accuracy.

Am Beispiel eines Gefechtssimulationsmodells lässt sich diese Tatsache ebenfalls verdeutlichen. Bekämpft ein Gefechtsobjekt ein Ziel, so kann dieser Vorgang anhand der physikalischen Daten der Waffe, der Entfernung zum Ziel, den aktuellen Windverhältnissen und einer Vielzahl weiterer Daten durch eine genau Berechnung der ballistischen Flugbahn des Geschosses modelliert werden. Es wäre jedoch ebenfalls denkbar, eine Datenbank anzulegen, welche zu allen möglichen Kombinationen von Eingabedaten die passenden Ergebnisse enthält.³⁹ Die Abbildung eines einzelnen Bekämpfungsvorgangs während der Simulation würde sich somit bei gleicher Modellgenauigkeit auf eine wesentlich weniger komplexe Datenbankabfrage beschränken.

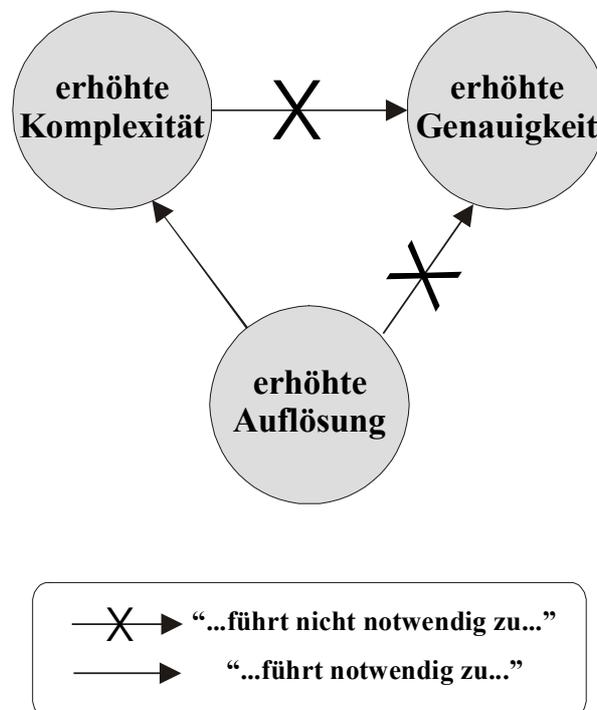


Abbildung 3.1: Beziehungen zwischen Auflösung, Genauigkeit und Komplexität eines Modells

³⁹ In der Praxis ist eine solche Datenbanklösung aufgrund der Vielzahl möglicher Eingabedatenkombinationen natürlich nur schwer zu realisieren. Zusätzlich muss man bei dieser Vorgehensweise feststellen, dass die Komplexität während der Simulationsläufe zwar reduziert wird, die Komplexität der Simulationsvorbereitung – in Form der Datenbankgenerierung – gleichzeitig aber erheblich steigt. Bei der normalerweise großen Zahl von Simulationsläufen, welche für statistische Zwecke notwendig sind, übersteigt der kumulierte Zeitgewinn, durch die Reduktion der Komplexität jedes einzelnen Simulationslaufs, den einmalig höheren Zeitaufwand bei der Simulationsvorbereitung jedoch vermutlich bei weitem.

3.2 Zur Bedeutung aggregierter und hochauflösender Gefechtssimulationsmodelle für Analysezwecke

3.2.1 Allgemeines

Untersuchungen zur **Aggregations-** und **Deaggregationsproblematik** stellen ein weites Forschungsfeld im Rahmen der Entwicklung neuer sowie der Kopplung bereits bestehender Gefechtssimulationssysteme unterschiedlicher Auflösungsstufen dar. Dies liegt unter anderem in der Tatsache begründet, dass neben hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen auch aggregierte Modelle mit niedriger Auflösung etwa für Analysezwecke notwendig sind. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Modelle vergleichbar bzw. Ergebnisse hochauflösender Modelle als Eingabedaten für Modelle niedriger Auflösung nutzbar zu machen, ist das Ziel der Aggregation bzw. Deaggregation, wobei die Wahrung der Konsistenz zwischen den Ergebnissen der einzelnen Auflösungsstufen das zentrale Problem darstellt.

3.2.2 Zur Bedeutung aggregierter Gefechtssimulationsmodelle

Unter **Aggregation** versteht man in Gefechtssimulationssystemen zumeist die Verringerung der Auflösung der Gefechtsobjekte durch das Zusammenfassen individueller Waffensysteme oder Teil-/Einheiten zu aggregierten Objekten. Detailinformationen⁴⁰ über die zusammengefassten atomaren Elemente gehen dabei üblicherweise verloren und werden in aggregierten Eigenschaften⁴¹ des neuen Objektes zusammengefasst. Die Erhöhung der Auflösung eines aggregierten Objektes, d.h. die Abbildung der korrespondierenden atomaren Elemente wird dagegen entsprechend als **Deaggregation** bezeichnet. Hierbei müssen die durch die Aggregation verlorenen Detailinformationen auf geeignete Weise aus den Eigenschaften des aggregierten Objektes ermittelt werden.

Das hierarchische System der militärischen Führungsebenen stellt für Gefechtssimulationssysteme eine mögliche natürliche Aggregationsreihenfolge dar. Dementsprechend können zum Beispiel Waffensysteme zu aggregierten Zugobjekten, Züge zu Kompanienobjekten sowie Kompanien zu Bataillonobjekten usw. zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 3.2). Für die Modellierung des Gefechts stellen diese aggregierten Objekte die Basiselemente dar, d.h. elementare Gefechtsprozesse, wie etwa Bewegungs-, Zielaufklärungs- oder Abnutzungsvorgänge, werden für bzw. zwischen diesen Objekten auf Basis ihrer aggregierten Eigenschaften modelliert. Zumeist geht mit der Aggregation der Gefechtsobjekte auch eine entsprechende Aggregation des Geländes einher, da etwa Geländemodelle hoher Auflösung für hochaggregierte Gefechtsobjekte kaum Sinn machen.⁴²

Aggregierte Gefechtssimulationsmodelle, d.h. also Modelle niedriger Auflösung⁴³, besitzen gegenüber hochauflösenden Modellen⁴⁴ spezifische Vorteile, die ihre Verwendung auch in Zukunft sinnvoll erscheinen lassen:

⁴⁰ Etwa die genaue Koordinatenposition jedes einzelnen Waffensystems, der individuelle Munitions- oder Betriebsstoffvorrat, etc.

⁴¹ Etwa *aggregierte Feuerkraft* als Summe der Feuerkraft der einzelnen Waffensysteme, *Personalstärke* als Summe der zusammengefassten Soldaten, *Koordinatenposition* als Schwerpunkt der Koordinatenpositionen der einzelnen Waffensysteme, etc.

⁴² vgl. Kapitel 3.1.2 für eine Erläuterung der Zusammenhänge zwischen Auflösung der Gefechtsobjekte und Geländeauflösung.

⁴³ Im Englischen zumeist als *Low-Resolution-Combat-Simulation-Systems* (LRCSS) bezeichnet.

⁴⁴ Im Englischen zumeist als *High-Resolution-Combat-Simulation-Systems* (HRCSS) bezeichnet.

1. **Geringere Komplexität:** Eine direkte Folge der geringeren Auflösung eines aggregierten Modells ist die daraus normalerweise resultierende geringere Komplexität⁴⁵. Aufgrund der geringeren Komplexität ist es einerseits bei konstantem Zeitaufwand und gleicher zur Verfügung stehender Rechenleistung möglich, mit einem aggregierten Modell deutlich mehr Simulationsläufe durchzuführen, als dies mit einem hochauflösenden Modell der Fall wäre. Eine größere Zahl von Simulationsläufen und damit Simulationsergebnissen bedeutet aber zumeist eine größere Genauigkeit der statistischen Auswertung der Ergebnisse und somit eine höhere Signifikanz der gewonnenen Erkenntnisse. Die Art der untersuchten Gefechtsprozesse und damit die möglichen Erkenntnisse sind selbstverständlich durch die Aggregation der Objekte beschränkt, da detaillierte Ursache-Wirkungs-Beziehungen nicht oder nur ungenau abgebildet werden. Andererseits kann die geringere Komplexität bei gleicher Zahl durchzuführender Simulationsläufe auch zur Reduktion der benötigten Rechenzeit bzw. Rechenleistung genutzt werden. Dies verbessert die Einsatzmöglichkeiten solcher Modelle, zum Beispiel zur Einsatzunterstützung, auf portablen Rechnern, welche nach wie vor über eine zumeist geringere Rechenleistung verfügen.
2. **Behandlung unscharfer Fragestellungen:**⁴⁶ Menschliche Entscheidungsprozesse befassen sich oft mit unscharfen, d.h. aggregierten Fragestellungen. Ein Übertragen dieser aggregierten Fragestellungen auf die möglichen Eingabeparameter hochauflösender Modelle stellt ein nicht triviales Problem dar, welches durch die Verwendung aggregierter Modelle vermieden werden kann. Das folgende einfache Beispiel soll diese Tatsache illustrieren:

Einen militärischen Führer beschäftigt die Frage, wie das geplante Gefecht verläuft, wenn seine Truppen nur „halb so gut“ kämpfen. Der Begriff „halb so gut“ lässt sich in einem hochauflösenden Gefechtssimulationsmodell nur indirekt über eine Vielzahl von Eingabeparametern (Feuergeschwindigkeit, Zielauffassungszeit, Treffwahrscheinlichkeit, etc.) modellieren und erfordert dazu ein tiefgehendes Verständnis der Zusammenhänge dieser Parameter im Modell. In einem aggregierten Modell, welches etwa Fire Power Scores⁴⁷ zur Abbildung der Güte einer Einheit nutzt, ist diese Fragestellung dagegen durch einfache Halbierung des angegebenen Wertes leicht nachzubilden.
3. **Deutung von Simulationsergebnissen:** Eine hohe Anzahl modellierter Parameter und Verbindungen macht eine Deutung gewonnener Simulationsergebnisse unter Umständen schwierig, da die Ursache- und Wirkungsbeziehungen, welche zu diesen Ergebnissen geführt haben, in detaillierten Modellen oft nur mit einem hohen analytischen Aufwand identifiziert werden können.⁴⁸ Gerade bei einer zeitkritischen Verwendung im Rahmen von Einsatzunterstützungssystemen wird jedoch häufig eine schnelle Analyse benötigt, so dass aggregierte Modelle – aufgrund ihrer leichteren Nachvollziehbarkeit – gegenüber hochauflösenden Detailsimulationssystemen hier im Vorteil sein können.
4. **Verfügbarkeit benötigter Eingabedaten:** Hochauflösende Gefechtssimulationssysteme benötigen in der Regel eine große Zahl von Eingabedaten, wie etwa Waffensystem- bzw. Geländedaten. Diese Daten – auch über feindliche Waffensysteme und bisher unbekannte

⁴⁵ vgl. Kapitel 3.1.4, S. 17f

⁴⁶ vgl. etwa [Bigelow, Davis 98]

⁴⁷ Fire Power Scores drücken die Kampfkraft einer Einheit in einem Zahlenwert aus. Sie errechnen sich primär aus Art und Anzahl der vorhandenen Waffensysteme.

⁴⁸ vgl. etwa [Hillestad et al. 95]

Einsatzgebiete – in validierter Form zeitgerecht bereitzustellen bzw. vorhandene Datenbestände zu pflegen, ist nur mit großem zeitlichem und finanziellem Aufwand möglich.⁴⁹ Aggregierte Modelle, welche mit relativ wenigen und teilweise unscharfen Eingabedaten auskommen, können gegebenenfalls somit gerade bei der kurzfristigen Einsatzvorbereitung Vorteile bieten. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass auch die Bereitstellung aggregierter Eingabedaten häufig mit grundsätzlichen Problemen und einem nicht zu vernachlässigendem zeitlichen Aufwand verbunden ist⁵⁰.

5. **Kosten der Modellentwicklung:** Modelle mit höherer Auflösung zeichnen sich gegenüber aggregierten Modellen durch eine gesteigerte Komplexität aus. Dies führt zu einem erhöhten Aufwand bei der Implementierung der Modelle sowie der notwendigen Validierungs- und Verifikationsarbeiten. Dieser erhöhte Aufwand schlägt sich selbstverständlich in einem zusätzlichen Zeitaufwand und gesteigerten Kosten für die Modellentwicklung nieder, so dass ein aggregiertes Modell gegebenenfalls schneller und kostengünstiger verfügbar sein kann.⁵¹

Es lässt sich somit zusammenfassend feststellen, dass aggregierte Modelle gegenüber hochauflösenden Modellen durchaus über Vorteile verfügen, welche sie für einen Einsatz auch bei zeitkritischen und menschlichen Denkvorgängen, d.h. unscharfen Fragestellungen, angepassten Aufgabe der Einsatzunterstützung geeignet erscheinen lassen.

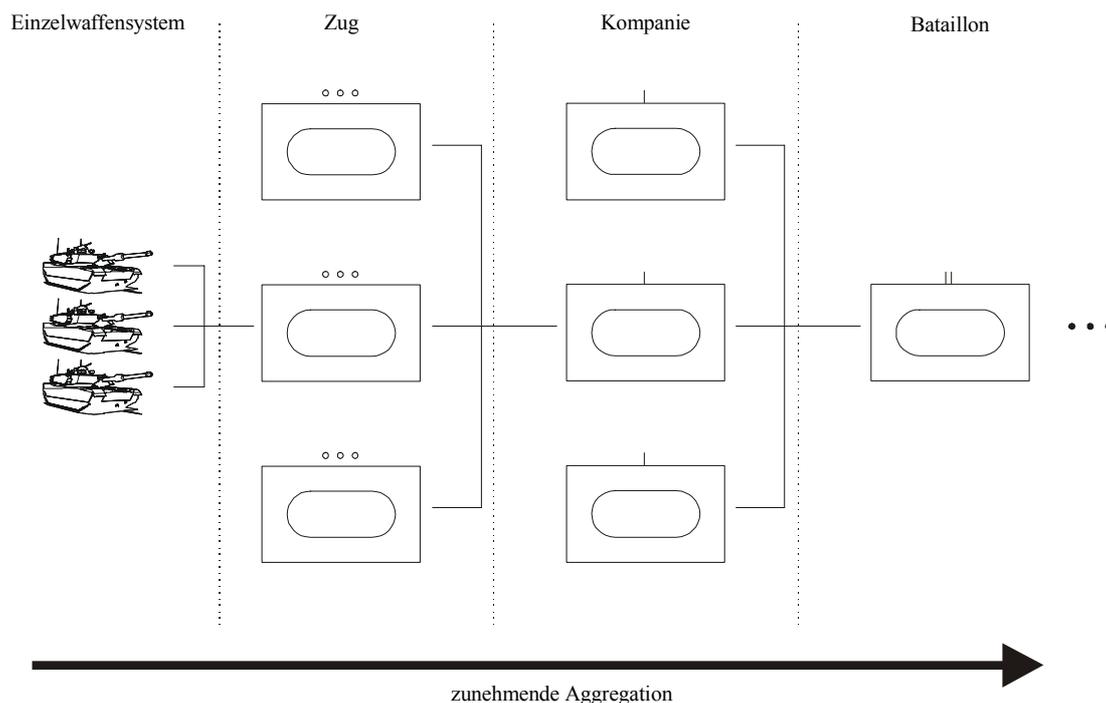


Abbildung 3.2: Darstellung möglicher Aggregationsstufen - analog zu militärischen Hierarchieebenen – für Gefechts-elemente in Simulationssystemen

⁴⁹ Die vollständige Erstellung und Anpassung einer 20x20 km großen Geländedatenbank aus Satellitenbildern für das 3D-Simulationsmodell IRIS benötigt z.B. nach [Hügler 2001] trotz teilweiser Automatisierung immer noch zwischen 40-50 MTge, d.h. 5-7 Wochen Arbeit.

⁵⁰ vgl. Kapitel 4.2.3 und 4.2.4

⁵¹ Hierbei wird von der Annahme ausgegangen, dass die zu betrachtenden Fragestellungen mit einem aggregierten Modell befriedigend untersucht werden können.

3.2.3 Zur Bedeutung hochauflösender Gefechtssimulationsmodelle

Hoch- und höchstauflösende Gefechtssimulationssysteme⁵² zeichnen sich vor allem durch eine detaillierte Abbildung einzelner Waffensysteme, des Gefechtsfeldes mit seinen wesentlichen Attributen, menschlichen Verhaltensweisen und Entscheidungsprozessen sowie komplexen Ursache- und Wirkungsbeziehungen aus. Aufgrund ihrer hohen Realitätsnähe bieten sich diese Modelle einerseits für die Ausbildung von Unter-/Führern niedriger militärischer Hierarchieebenen⁵³ an. Das auszubildende Personal wird durch sie in die Lage versetzt, in einer bekannten Umwelt, d.h. mit geläufigen Parametern zu arbeiten und ist somit nicht gezwungen, sich in ihm fremde aggregierte Eingabedaten und Prozessbeschreibungen einzuarbeiten. Ein Beispiel soll diesen Vorteil verdeutlichen:

Ein Zugführer der Panzertruppe simuliert das Gefecht des ihm unterstellten Zuges (4 Kampfpanzern) mit einem fiktiven Feind. Ein hochauflösendes Modell ermöglicht ihm Übungen und Analysen durchzuführen und dabei Parameter, wie etwa die Kadenz der Bordkanone, den Munitionsvorrat oder die Höchstgeschwindigkeit der einzelnen Panzer zu variieren, welche ihm bekannt sind und deren Einfluss auf das Gefechtsgeschehen er einschätzen und nachvollziehen kann. Bei der Benutzung eines aggregierten Modells, welches beispielsweise einen Lanchesteransatz⁵⁴ verwendet, wäre der Zugführer dagegen gezwungen, ihm unbekannt Parameter, wie etwa die Lanchesterkoeffizienten, zu manipulieren, um seine Fragestellung abzubilden.

Neben dem Einsatz zur Ausbildung eignen sich hoch- und höchstauflösenden Modelle andererseits vor allem zur Analyse des Einflusses sehr spezifischer Einzelgrößen oder –prozesse auf das Gefechtsgeschehen, zur Generierung von Eingabedaten für aggregierte Modelle⁵⁵ sowie zur Bewertung neuer Waffensysteme während des Entwicklungs- und Beschaffungsvorgangs. Beispiele dazu wären ein detailliertes und physikalisch fundiertes Kommunikationsmodell als Grundlage für die Untersuchung der Bedeutung moderner Führungsvorgänge im Gefecht bzw. eine hochauflösende Abbildung des Gefechtsfeldes inklusive relevanter Umweltbedingungen für die Bewertung des Nutzens neuer Optik- und Zielsysteme. Besonders der Einsatz solcher Modelle im Rahmen der Bewertung neuer Waffensysteme und Einsatzgrundsätze bietet neben üblichen Feldversuchen eine kostengünstige Alternative und gewinnt somit vor dem Hintergrund des notwendigen Sparzwangs zunehmend an Bedeutung.

Aus wissenschaftlicher Sicht stellt die Entwicklung hoch- und höchstauflösender Modelle zusätzlich einen wichtigen Anreiz dar, komplexe Zusammenhänge und physikalische Prozesse sowie vor allem auch menschliche Verhaltensweisen und kognitive Vorgänge intensiv zu erforschen, da nur ein fundiertes Verständnis dieser Aspekte eine adäquate und somit realitätsnahe Modellierung des modernen Gefechts der verbundenen Waffen innerhalb eines hoch- und höchstauflösenden Gefechtssimulationssystems erlaubt.

⁵² Die Modelle COSIMAC-WS-S (vgl. [Hofmann et al. 2000]) oder das 3D-Model IRIS (vgl. [Hügler 2000]) können als Beispiel für moderne hoch- und höchstauflösenden Gefechtssimulationssysteme gelten.

⁵³ Etwa Gruppe, Zug, Kompanie

⁵⁴ vgl. Kapitel 4.2, S. 51ff

⁵⁵ Ein Beispiel dafür stellt die Verwendung des hochauflösenden Gefechtssimulationssystems BASIS zur Gewinnung von Lanchesterkoeffizienten. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise sowie auftretender Probleme enthält [Schaub 91a].

3.2.4 Zusammenfassung

Ausgehend von den beschriebenen Vorteilen aggregierter Modelle einerseits und hoch- bzw. höchstauflösender Modelle andererseits muss zusammenfassend festgestellt werden, dass keine der beiden Arten a priori überlegen ist. Der in jüngerer Zeit zu beobachtende Trend immer detailliertere und realitätsnähere Gefechtssimulationssysteme zu entwickeln, ist aus den beschriebenen Gründen wissenschaftlich sicherlich sinnvoll und nutzbringend. Es sollte dabei jedoch vermieden werden, auf Seiten der Modellnutzer den grundsätzlich falschen Eindruck zu erwecken, dass solche Modelle für alle denkbaren Einsatzzwecke die bessere Lösung darstellen. Ausschlaggebend für die Entscheidung ein aggregiertes bzw. hoch-/höchstauflösendes Modell zu entwickeln und einzusetzen, sollte nach wie vor einzig der beabsichtigte Verwendungs- oder Analysezweck sein. [Hillestad et al. 95] drückt diese Tatsache mit folgender prägnanter Aussage aus:

Analysis leads, not the model. This means that models must be selected and tailored to fit the analysis; the analysis must not be reshaped to suit preferred models.

Wichtig ist es deshalb festzuhalten, dass gerade die Analyse mit Hilfe von Gefechtssimulationssystemen von der Existenz und dem Zusammenspiel sowohl aggregierter als auch hochauflösender Modelle profitiert.

Einerseits können hochauflösende Modelle offensichtlich zur Ermittlung von aggregierten Parametern und zur Kalibrierung entsprechender Modelle verwendet werden.⁵⁶ Andererseits ist ein analoger Austausch in der Gegenrichtung auch denkbar und üblich. Aggregierte Modelle, etwa für militärische Kommunikations- und Führungsvorgänge, logistische Abläufe oder ähnliches, können sinnvoll dazu benutzt werden, hochauflösende Modelle, zum Beispiel durch Unterstützung bei der Ermittlung von Anfangsstärken oder Nachschubraten, zu ergänzen. Zusätzlich können aggregierte Modelle dazu dienen, im Rahmen einer Analyse mit relativ geringem Aufwand schnell erste Arbeitshypothesen oder Grundüberlegungen aufzustellen, welche dann im weiteren Verlauf durch Untersuchungen mit hochauflösenden Modelle nachgeprüft bzw. verfeinert werden können.

⁵⁶ Vgl. Kapitel 4.2.3, S. 64 für eine kurze Beschreibung der Vorgehensweise zur Ermittlung aggregierter Lanchesterkoeffizienten aus Simulationsergebnissen eines hochauflösenden Modells.

3.3 Zur Kopplung von aggregierten und hochauflösenden Gefechtssimulationsmodellen

3.3.1 Allgemeines

In dem vorangegangenen Kapitel wurden spezifische Vor- und Nachteile sowohl aggregierter als auch hochauflösender Modelle diskutiert. Aus Sicht eines Modellnutzers ist es jedoch wünschenswert, die Vorteile beider Kategorien zu kombinieren. Eine denkbare Methode, um dies zu erreichen, sind Modelle bzw. Modellverbunde, welche das Gefechtsgeschehen auf unterschiedlichen Auflösungsstufen abbilden können, so dass je nach aktuellem Verwendungszweck des Simulationssystems eine möglichst flexible Wahl zwischen aggregierter und hochauflösender Modellierung des gesamten Gefechtsgeschehens oder ausgesuchter Teilaspekten davon möglich wird. Um dieses Ziel zu erreichen, bieten sich zunächst zwei alternative Vorgehensweisen an:

1. Die **Kopplung bereits existierender Modelle**, welche über unterschiedliche Stufen der Auflösung verfügen. Dieser Ansatz wird im Rahmen des *Cross Resolution Modeling*⁵⁷ untersucht. Er bietet den Vorteil auf die zeit- und kostenintensive Neuentwicklung von Modellen zugunsten bereits etablierter Modelle verzichten zu können, muss sich aber zu diesem Zweck auf neu zu entwickelnde Aggregations- und Deaggregationsverfahren abstützen, welche im Rahmen der Kopplung einen konsistenten Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Modell und Auflösungsstufen ermöglichen.
2. Die **Neuentwicklung von Modellen** mit der Fähigkeit, die gesamte Modellauflösung oder zumindest die Auflösung von Teilen des Modells angepasst an den jeweiligen Bedarf des Modellnutzers zu variieren. Das *Variable Resolution Modeling*⁵⁸ beschreibt mögliche Ausprägungen der Umsetzung dieses Ansatzes sowie deren Klassifizierungsmerkmale.

Während die unterschiedlichen Vorgehensweisen über spezifische Vor- und Nachteile verfügen, welche in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert werden sollen, ist ihnen jedoch die Notwendigkeit zur Herstellung und Wahrung der Konsistenz der Daten zwischen einzelnen Modellen bzw. Auflösungsstufen gemein.

⁵⁷ vgl. Kapitel 3.3.3, S. 28ff

⁵⁸ vgl. Kapitel 3.3.4, S. 36ff

3.3.2 Der Begriff der Konsistenz

In der Gefechtssimulation unterscheidet man üblicherweise zwischen einer starken sowie einer schwachen Form der Konsistenz. Um das herkömmliche Verständnis dieser Begriffe zu verdeutlichen, stelle man sich die folgende Situation (vgl. Abbildung 3.3) vor:

Es existiere ein aggregiertes Simulationsmodell 1, ein hochauflösendes Simulationsmodell 2 sowie entsprechende Aggregations- und Deaggregationsmechanismen, mit deren Hilfe eine Abbildung der Anfangs- und Endzustände des Modells 1 auf die Auflösungsebene des Modells 2 und vice versa möglich ist.

Man spricht in einem solchen Fall dann von **schwacher Konsistenz**, falls die aggregierten Endzustände (*Zustand C bzw. C'*) übereinstimmen, d.h. wenn eine Simulation mit dem Modell 2 auf Basis eines hochauflösenden Anfangszustands (*Zustand B'*) und anschließender Aggregation des daraus resultierenden hochauflösenden Endzustands (*Zustand D'*) den gleichen Zustand liefert, wie eine Simulation mit Modell 1 auf Basis eines aggregierten Anfangszustands (*Zustand A*).

Von **starker Konsistenz** spricht man dagegen, falls die hochauflösenden Endzustände (*Zustand D bzw. D'*) übereinstimmen, d.h. wenn eine Deaggregation des Endzustands nach Simulation eines aggregierten Anfangszustands (*Zustand A*) mit Hilfe von Modell 1 in dem gleichen Zustand resultiert, wie die Simulation eines hochauflösenden Anfangszustands (*Zustand B'*) mit Modell 2.

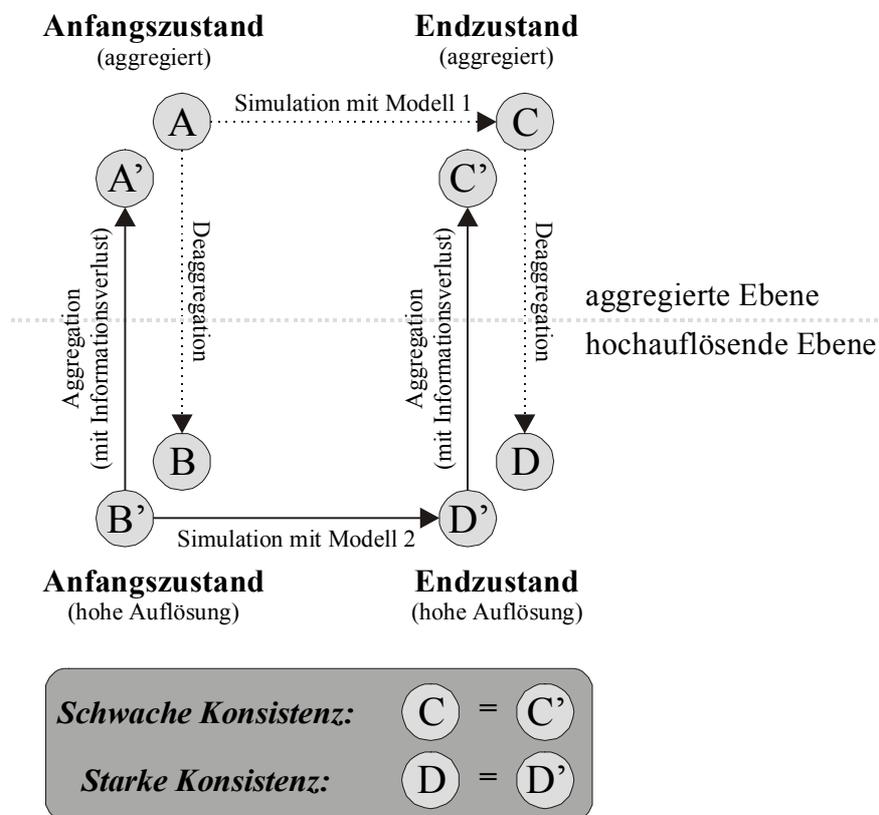


Abbildung 3.3: Herkömmliche Sichtweise von schwacher und starker Konsistenz nach [Davis, Bigelow 98]

[Davis, Bigelow 98] weisen jedoch darauf hin, dass diese Definition der starken und schwachen Konsistenz den Eindruck einer impliziten Überlegenheit der hochauflösenden Modellierung vermitteln könnte, da der Verlust von Information im Rahmen des Aggregationsprozesses durch das Diagramm (vgl. Abbildung 3.3) betont wird. Sie argumentieren weiterhin, dass ein Vergleich der Endzustände als Entscheidungskriterium für das Vorhandensein von Konsistenz nicht der Realität der Verwendung von Gefechtssimulationssystemen entspricht. [Davis, Bigelow 98] schlagen deshalb alternativ vor, nicht die gesamten sondern vielmehr nur den wesentlichen Teil der Endzustände – die im Rahmen der jeweiligen Analyse relevanten Simulationsergebnisse – zu vergleichen. Zusätzlich sollte dabei von der strengen Identitätsforderung abgewichen werden, indem im Rahmen des Vergleichs der Ergebnisse Abweichungen in nicht relevanter Größenordnung ignoriert werden (vgl. Abbildung 3.4).

Auf diesen Forderungen aufbauend, kann man somit von **schwacher Konsistenz** sprechen, wenn die relevanten Simulationsergebnisse (*Zustand E*) – erhalten durch eine Projektionsoperation aus dem aggregierten Endzustand der Simulation mit Modell 1 – bis auf einen vernachlässigbaren Fehler⁵⁹ den Ergebnissen (*Zustand E'*) entsprechen, welche man durch eine Projektionsoperation aus dem Endzustand (*Zustand C'*) erhält, der das Resultat einer Simulation mit dem Modell 2 darstellt.

Von **starker Konsistenz** kann analog gesprochen werden, wenn die relevanten Simulationsergebnisse hoher Auflösung (*Zustand F und F'*) – welche ebenfalls durch Projektionsoperationen aus den Endzuständen hoher Auflösung (*Zustand D und D'*) erhalten werden – wiederum bis auf einen vernachlässigbaren Fehler übereinstimmen.

Im Unterschied zu der herkömmlichen Definition von starker und schwacher Konsistenz legt die von [Davis, Bigelow 98] vorgeschlagene Sichtweise starken Wert auf die Betonung der Tatsache, dass sowohl aggregierte als auch hochauflösende Modelle über spezifische Vorteile und somit eine Berechtigung in der Analyse besitzen. Das Erreichen sowohl starker Konsistenz – etwa bei der Kalibrierung hochauflösender Modelle mit Ergebnissen aggregierter Modelle – als auch von schwacher Konsistenz – im umgekehrten Fall, also bei der Bereitstellung von Daten für aggregierte Modelle aus Ergebnissen hochauflösender Modelle – ist von wesentlicher Bedeutung im Modellierungsprozess. Die Unterscheidung zwischen starker und schwacher Konsistenz sollte somit nicht als Wertung sondern vielmehr als rein begriffliches Konstrukt im Rahmen des jeweiligen Anwendungszwecks der Modelle verstanden werden.

⁵⁹ Der Begriff des „vernachlässigbaren Fehlers“ ist in diesem Zusammenhang als unscharf zu betrachten. Abweichungen welcher Größenordnung im Rahmen dieser Definition als „vernachlässigbar“ gelten, kann nicht allgemeingültig festgelegt werden. Es handelt sich dabei vielmehr um eine Einzelfallentscheidung, welche durch den Benutzer in Abhängigkeit von dem jeweiligen Inhalt und Umfang der Analyse getroffen werden muss.

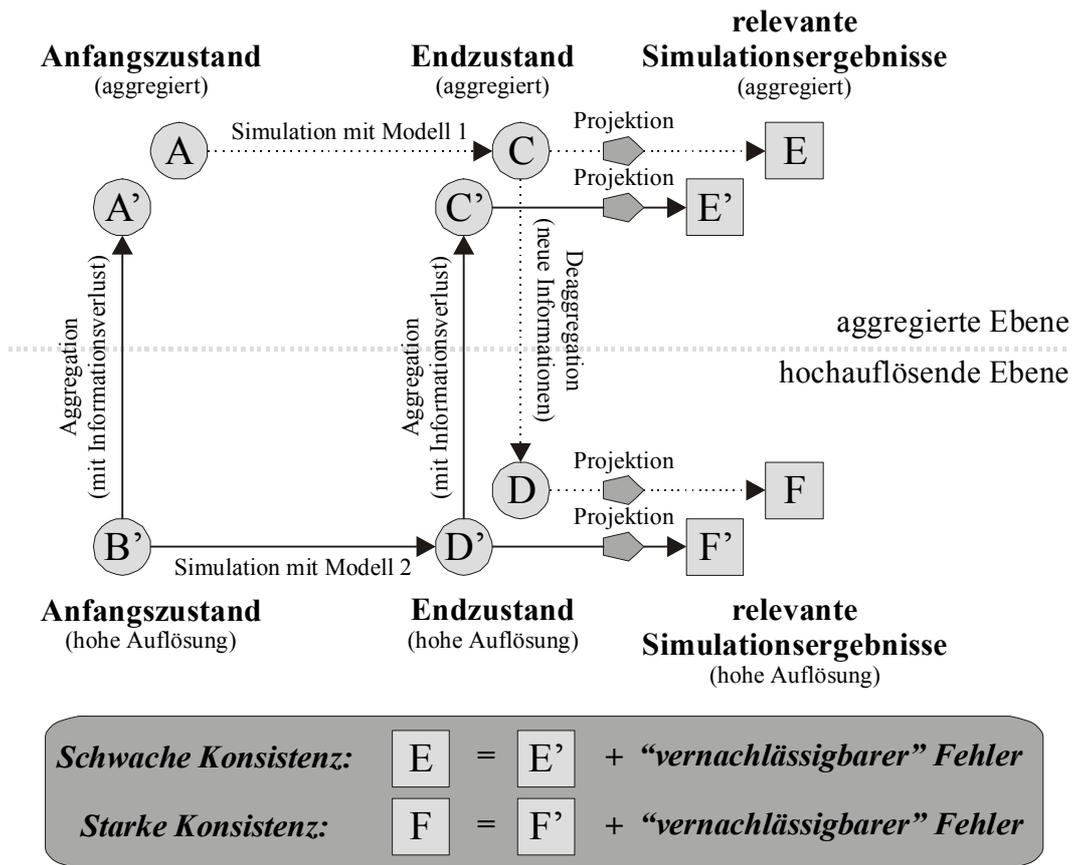


Abbildung 3.4: Verbesserte Sichtweise von starker und schwacher Konsistenz nach [Davis, Bigelow 98]

3.3.3 Der Ansatz des Cross Resolution Modeling (CRM)

3.3.3.1 Allgemeines zum Ansatz des CRM

Der in [Davis, Hillestad 93] vorgeschlagene Ansatz des **Cross Resolution Modeling (CRM)**⁶⁰ beschäftigt sich mit der Lösung von Darstellungs- und Konsistenzproblemen, welche sich aus der Kopplung von existierenden Modellen unterschiedlicher Auflösungsstufe ergeben. Das Cross Resolution Modeling arbeitet dazu mit Aggregations- und Deaggregationsmechanismen, um sicherzustellen, dass Objekte aus Modellen unterschiedlicher Auflösung auf einer gemeinsamen Auflösungsstufe interagieren können. Sollen ein aggregiertes und ein Objekt hoher Auflösung in Kontakt treten, so wird dazu in der Regel das aggregierte Objekt in seine atomaren Elemente deaggregiert. Die Interaktion findet dann zwischen diesen atomaren Elementen und dem Objekt hoher Auflösung statt.⁶¹

In Übereinstimmung mit der, zum Beispiel in [Reynolds et al. 97] verwendeten Notation, sollen aggregierte Objekte, zum Beispiel Zug- oder Kompanieelemente, im Folgenden als Elemente niedriger Auflösung (*Low Resolution Entity = LRE*) und nicht aggregierte Elemente, zum Beispiel ein individuelles Waffensystem, als Elemente hoher Auflösung (*High Resolution Entity = HRE*) bezeichnet werden.

3.3.3.2 Probleme der Aggregation und Deaggregation

Der im Rahmen des Cross Resolution Modeling verwendete Ansatz der Aggregation und Deaggregation ist mit Problemen verbunden, von denen einige hier kurz vorgestellt werden sollen:

1. **Zeitliche Inkonsistenz (Temporal Inconsistency)**: Das Problem der zeitlichen Inkonsistenz kann bei der Kopplung von Simulationsmodellen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung auftreten. Ein Objekt, welches in beiden Modellen abgebildet wird, kann innerhalb des Modells mit der höheren zeitlichen Auflösung seinen Zustand häufiger wechseln, als dies in dem Modell mit der geringeren zeitlichen Auflösung der Fall ist. Es somit eine zeitliche Inkonsistenz zwischen den Modellen möglich, da ein Objekt zum selben Zeitpunkt in den Modellen unterschiedliche Zustände haben kann. Man betrachte dazu das folgende Beispiel:

Es existieren zwei gekoppelte Zeitschrittsimulationsmodelle ZM1 und ZM2 mit einer Schrittlänge von 1 Minute respektive 1 Sekunde, mit drei Waffensystemobjekten WS1, zu ZM1 gehörend, sowie WS2 und WS3, welche zu ZM2 gehören. Nach einer Interaktion verändern für WS1 die Elemente WS2 oder WS3 ihren Zustand für die Länge eines Zeitschritts von 1 Minute nicht. WS2 und WS3 können im Rahmen von ZM2 jedoch im gleichen Zeitraum durch eine Vielzahl von Interaktionen ihren jeweiligen Zustand durchaus ändern. WS2 und WS3 verfügen somit in ZM1 und ZM2 über unterschiedliche Abbildungen. Sollte zum Zwecke einer Interaktion zwischen WS1 und WS2/WS3 eine zeitliche Aggregation bzw. Deaggregation zwischen den beiden Modellen notwendig werden, kann diese Inkonsistenz zu Problemen führen.

⁶⁰ vgl. auch [Reynolds et al. 97]

⁶¹ Dies bedeutet zum Beispiel, dass das Panzerzugobjekt eines aggregierten Modells zur Interaktion mit einem einzelnen Kampfpanzer eines hochauflösenden Modells deaggregiert wird, so dass die Panzer des Zugobjektes mit dem einzelnen Feindpanzer interagieren können.

2. **Kettendeaggregation** (*Chain Deaggregation*⁶²): Der Begriff der Kettendeaggregation beschreibt einen Dominoeffekt bei der Deaggregation (vgl. Abbildung 3.5), der durch die Vielzahl möglicher Interaktionen zwischen Objekten unterschiedlicher Auflösung entstehen kann. Tritt ein LRE A_1 , welches mit anderen LREs A_2, \dots, A_n in Interaktion steht, in Kontakt mit einem HRE B_1 , so wird es in der Regel deaggregiert, um dem Grundsatz nachzukommen, dass Objekte stets auf einer einheitlichen Auflösungsstufe interagieren sollen. Dadurch werden aber gleichzeitig ebenfalls die LREs A_2, \dots, A_n zur Deaggregation gezwungen, um weiterhin mit dem nun deaggregierten LRE A_1 in Kontakt bleiben zu können. Der Effekt kann sich über die LREs A_2, \dots, A_n auf weitere LREs ausweiten, welche mit diesen in Verbindung stehen, so dass eine große Zahl von Deaggregationsvorgängen notwendig wird und sich die Zahl simulierter Objekte dadurch schlagartig erheblich vergrößert. Dieser Effekt stellt enorme Anforderung an die Rechenleistung und das jeweilige Simulationsmodell.

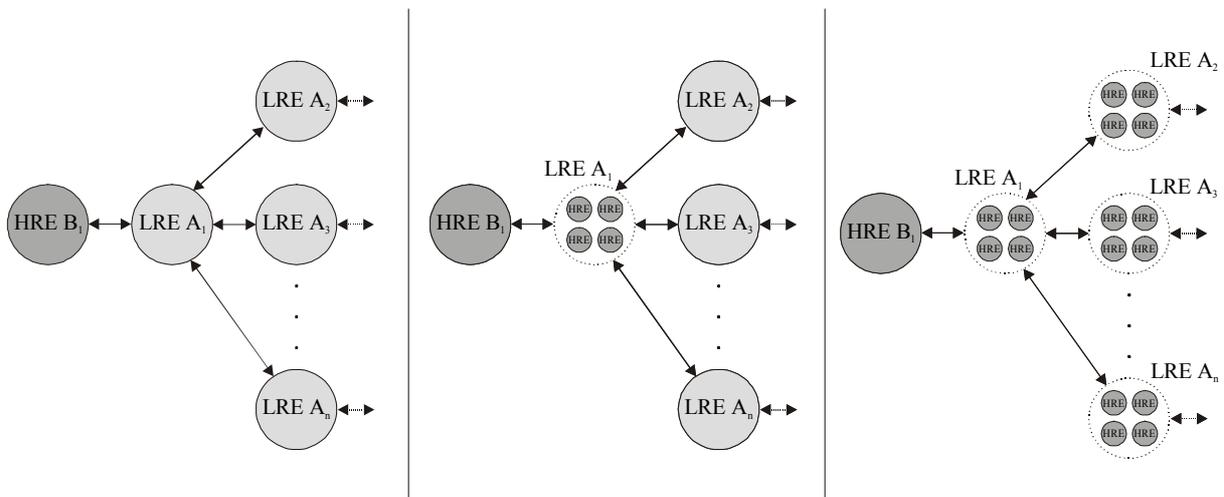


Abbildung 3.5: Problem der Kettendeaggregation nach [Reynolds et al. 97]

3. **Inkonsistenz in der Abbildung** (*Mapping Inconsistency*): Als Inkonsistenz in der Abbildung bezeichnet man die Tatsache, dass ein Objekt durch mehrere Aggregations- und Deaggregationsvorgänge einen Zustand erreichen kann, welcher normalerweise im gleichen Simulationszeitraum nicht möglich wäre. Ein typisches Beispiel (vgl. Abbildung 3.6) für dieses Problem ist:

Gegeben sind HREs (z.B. Kampfpanzer), welche durch einen Aggregationsvorgang in einem LRE (Panzerzug) zusammengefasst werden. Die Information über die einzelnen Koordinatenpositionen der HREs geht dabei in der Regel verloren und wird durch die Position des LRE ersetzt, welche im Rahmen der Aggregation zum Beispiel durch Schwerpunktbildung aus den individuellen Koordinatenpositionen entsteht. Unterliegt der Panzerzug nach sehr kurzer Zeit wieder einem Deaggregationsvorgang, so benötigen die neu zu modellierenden HREs individuelle Koordinatenpositionen, welche durch einen Algorithmus aus der einzelnen Position des LRE ermittelt werden. Die so ermittelten Positionen müssen mit den ursprünglichen Positionen der HREs nicht übereinstimmen, so dass diese einen räumlichen Sprung durchführen, welcher innerhalb dieses Simulationszeitraums unter Umständen nicht möglich ist.

⁶² Im Englischen auch als *Chain Disaggregation* bzw. *Spreading Disaggregation* bezeichnet.

[Franceschini et al. 2000] beschreiben mathematische Aggregations- und Deaggregationsalgorithmen, bei deren Verwendung das Auftreten von Inkonsistenzen in der Abbildung vermieden werden kann. Das Auffinden solcher Algorithmen stellt jedoch nicht immer eine triviale Aufgabe dar. In Fällen, in denen solche Algorithmen nicht verfügbar sind, muss das Problem der Inkonsistenz in der Abbildung somit auf andere geeignete Weise gelöst werden.

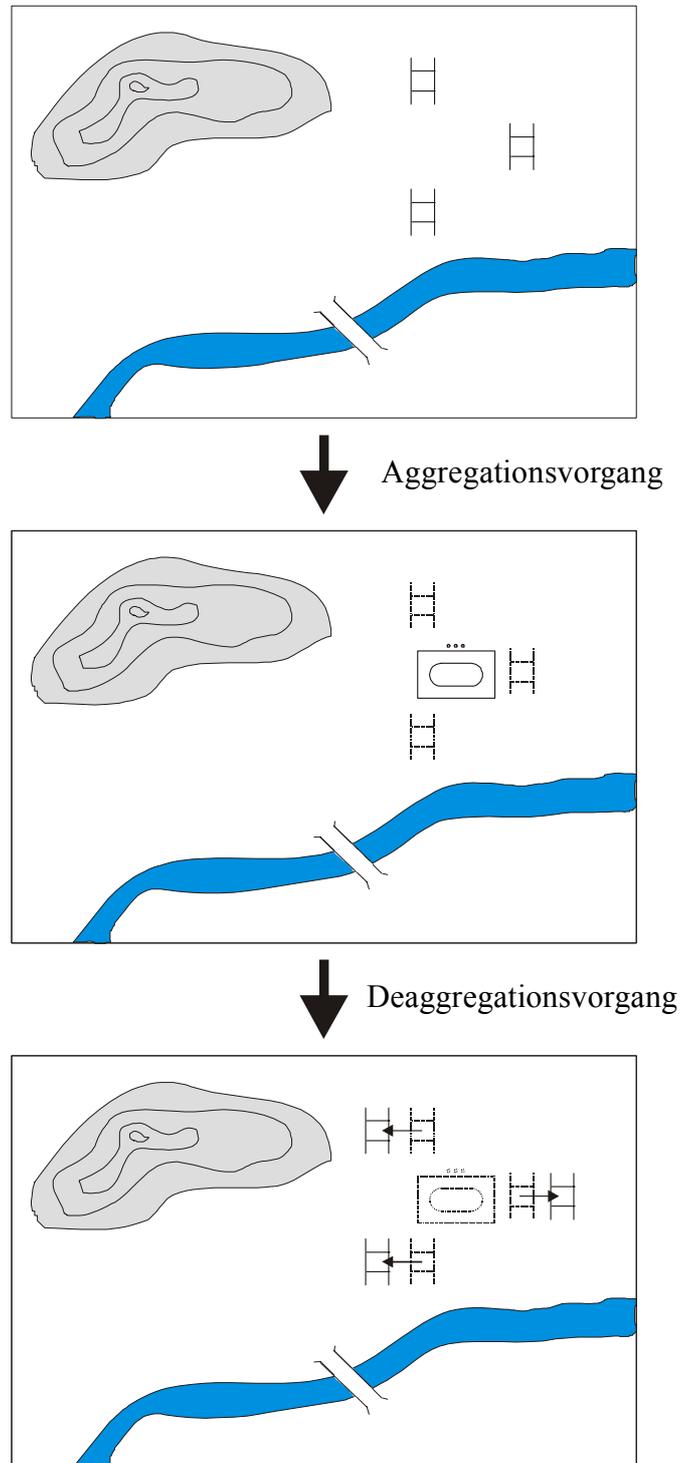


Abbildung 3.6: Inkonsistenz in der Abbildung (*Mapping Inconsistency*)

4. **Übergangslatenzenzeiten** (*Transition Latency*): Im Rahmen eines Aggregations- bzw. Deaggregationsvorgangs vollführt das jeweilige Objekt einen Übergang auf eine andere Auflösungsstufe. Dieser Übergang beinhaltet im Falle der Aggregation das Ermitteln aggregierter Zustände bzw. im Falle der Deaggregation der individuellen Zustände der atomaren Elemente aus den jeweils vorhandenen Daten. Diese Berechnungen sind mit einem Zeitaufwand verbunden, welcher als Übergangslatenzzeit bezeichnet wird. Sehr große Übergangslatenzzeiten in Modellen sind offensichtlich gerade bei zeitkritischen Verwendungen, zum Beispiel im Rahmen von Einsatzunterstützungssystemen, problematisch. Zusätzlich können sie aber auch besonders in interaktiven Echtzeitgefechtssimulationssystemen zu Inkonsistenzen in der Wahrnehmung oder dem Verständnis des menschlichen Bedieners führen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass ein Objekt, welches einem Aggregations-/Deaggregationsvorgang unterliegt, keine Interaktionen mit anderen Objekten oder dem menschlichen Bediener durchführen kann, bis der jeweilige Vorgang abgeschlossen ist. Während dieses Zeitraums auflaufende Interaktionsanfragen werden somit nach der Aggregation/Deaggregation gesammelt abgearbeitet. Bei dem Bediener entsteht dadurch der falsche Eindruck einer zeitweiligen Untätigkeit des Objektes mit anschließender intensiver Aktivität. Seine Wahrnehmung ist somit mit dem Ablauf des simulierten Gefechts nicht mehr konsistent.

5. **Auflösungszosillation** (*Trashing*): Als Auflösungszosillation soll das Problem bezeichnet werden, dass ein Objekt innerhalb kurzer Zeit mehrere Aggregations-Deaggregations-Zyklen durchläuft (vgl. Abbildung 3.7). In Kombination mit dem beschriebenen Problem der Übergangslatenzzeiten kann dies dazu führen, dass ein solches Objekt eine signifikante Zeit mit reinen Aggregations- und Deaggregationsberechnungen verbringt. Ausgelöst wird dieser Effekt etwa durch ein HRE, welches sich an der Grenze des Kontaktbereichs⁶³ eines LRE bewegt. Betritt das HRE diesen Bereich, so wird das LRE normalerweise zur Deaggregation gezwungen, um mit ihm interagieren zu können. Verlässt das HRE dagegen diesen Bereich, so wird das LRE wieder seine ursprüngliche Auflösungsstufe einnehmen, d.h. es wird aggregiert. Der Fortbewegungsweg des HRE kann aber so beschaffen sein, dass es den Bereich häufig betritt und wieder verlässt und damit das LRE zu ständiger Deaggregation und Aggregation zwingt, d.h. die Auflösung des LRE oszilliert. Das Auftreten der Auflösungszosillation hängt selbstverständlich primär von dem Algorithmus ab, welcher über den Zeitpunkt der Aggregation und Deaggregation entscheidet. Geeignete Algorithmen können dieses Problem weitestgehend verhindern.

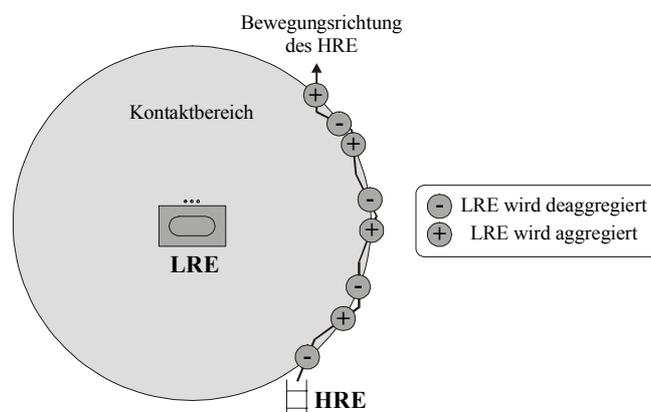


Abbildung 3.7: Darstellung der Auflösungszosillation

⁶³ Als Kontaktbereich wird hier der Bereich um ein LRE bezeichnet, in dem es in Kontakt mit einem anderen Objekt treten kann, d.h. in dem das Auftreten eines HRE eine Deaggregation notwendig macht.

3.3.3.3 Ansätze zur Aggregation und Deaggregation

Bei der Verwendung von Aggregation und Deaggregation in Gefechtssimulationssystemen gibt es verschiedene Ansätze, welche über spezifische Vor- und Nachteile verfügen. Diese Ansätze unterscheiden sich – neben den jeweiligen Algorithmen zur Bestimmung der aggregierten bzw. deaggregierten Zustände – im Wesentlichen durch die Entscheidung wann und in welchem Umfang eine Aggregation bzw. Deaggregation der betroffenen Objekte ausgelöst wird. Verbreitete Ansätze dabei sind:

1. **Vollständige Deaggregation** (*Full Deaggregation*⁶⁴): Bei einer Vollständigen Deaggregation wird das betroffenen LRE komplett in seine atomaren HREs zerlegt, um somit auf einer gleichen Auflösungsstufe mit einem oder mehreren anderen HREs zu interagieren (vgl. Abbildung 3.8). Die individuellen Zustände dieser atomaren HREs werden dabei aus dem aggregierten Zustand des ursprünglichen LRE ermittelt. Es ist festzustellen, dass von den atomaren HREs, aus denen sich ein LRE zusammensetzt, nicht notwendig alle mit den anderen HREs, welche zu der Deaggregation geführt haben, interagieren. Bekämpft zum Beispiel ein einzelner Kampfpanzer (HRE) gezielt einen feindlichen Panzerzug (LRE), bestehend aus vier Panzerfahrzeugen, so findet die Interaktion primär zwischen zwei HREs – dem schießenden und dem beschossenen – statt. Die übrigen HREs, welche durch Deaggregation aus dem LRE entstanden sind, werden erst dann benötigt, wenn sie durch diese Interaktion betroffen sind, d.h. etwa in den Feuerkampf eingreifen. Ist dies jedoch nicht der Fall, so war ihre Berechnung – ausgehend von der Annahme, dass nach Beendigung der Interaktion wieder eine Aggregation der HREs zu einem LRE stattfindet – im Rahmen der Deaggregation unnötig. Zusätzlich besteht bei der Verwendung der Vollständigen Deaggregation offensichtlich die Gefahr des Auftretens der Kettendeaggregation und Inkonsistenzen in der Abbildung⁶⁵. Gerade das Problem der Kettendeaggregation und das damit verbundene plötzliche Anwachsen der Zahl der simulierten Objekte resultiert in hohen Anforderungen an das verwendete Rechensystem und lässt die Vollständige Deaggregation somit nur für Modelle kleinen Maßstabs, d.h. mit wenigen simulierten Objekten, geeignet erscheinen.

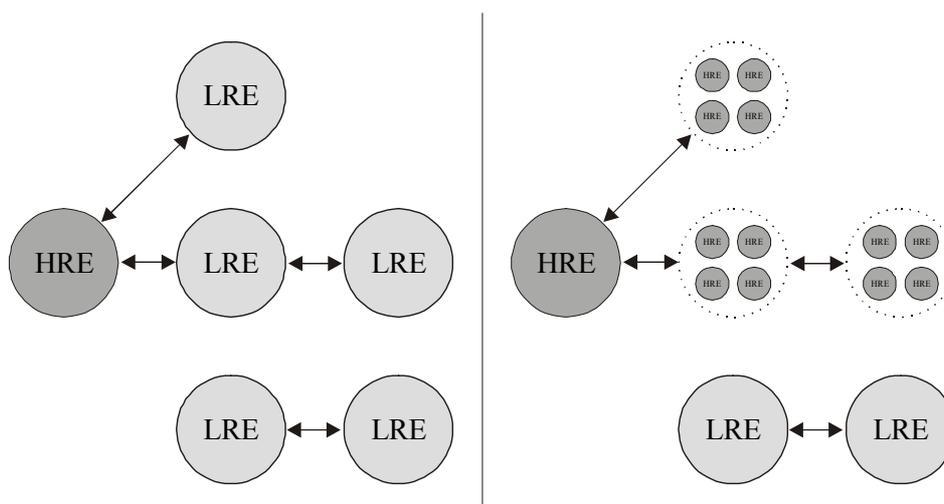


Abbildung 3.8: Vollständige Deaggregation mit Auftreten des Problems der Kettendeaggregation nach [Reynolds et al. 97]

⁶⁴Im Englischen auch als *Full Disaggregation* bezeichnet.

⁶⁵ vgl. Kapitel 3.3.3.2, S. 28ff

2. **Partielle Deaggregation** (*Partial Deaggregation*⁶⁶): Der Ansatz der Partiellen Deaggregation versucht die beschriebenen Probleme, welche mit der Vollständigen Deaggregation verbunden sind, zu umgehen, indem nur der real benötigte Teil des jeweiligen LREs deaggregiert wird (vgl. Abbildung 3.9). Die Idee dabei ist es, nur den Teil des ursprünglichen LRE, welcher mit dem jeweiligen HRE interagieren muss, in die entsprechenden atomaren HREs zu deaggregieren, während die restlichen Teile des LRE aggregiert verbleiben und somit gleichzeitig mit anderen LREs in Verbindung treten können. Ein Auftreten der Kettendeaggregation kann dadurch weitgehend vermieden werden. Als problematisch für den Ansatz der Partiellen Deaggregation kann sich jedoch unter Umständen das Auffinden geeigneter Partitionen innerhalb des LRE erweisen. Nur wenn eine eindeutige Trennung zwischen den Teilen des LRE möglich ist, welche deaggregiert werden müssen und denen, welche aggregiert verbleiben, ist dieser Ansatz realisierbar. Die Möglichkeit zur Nutzung der Partiellen Deaggregation hängt selbstverständlich auch von der Art der Interaktionen zwischen dem HRE und den betroffenen LREs zusammen. Die Art der Interaktion muss eine Partielle Deaggregation erlauben. Dies ist jedoch nicht notwendigerweise der Fall. In dem bereits beschriebenen Beispiel des einzelnen Kampfpanzers (HRE), welcher gezielt ein Fahrzeug eines Panzerzugs (LRE) bekämpft, bietet sich der Ansatz der Partiellen Deaggregation an. Man würde in diesem Fall nur das betroffene Fahrzeug des LRE für die Bekämpfung als HRE deaggregieren. Die restlichen Fahrzeuge des Panzerzugs müssten dagegen nicht explizit als HREs abgebildet werden. Überflüssiger Deaggregations- und Verwaltungsaufwand neu zu simulierender Objekte wird somit vermieden. Würde der einzelne Kampfpanzer (HRE) dagegen den feindlichen Panzerzug (LRE) zum Zweck der Zielauswahl aufklären, so müsste das LRE unter Umständen vollständig deaggregiert werden, um damit dem HRE die für die Auswahl relevanten Einzelinformationen über die atomaren Elemente zukommen lassen zu können. Die Verwendung der Partiellen Deaggregation wäre in diesem Fall also nicht möglich. Dies muss jedoch nicht zwangsläufig zu Kettendeaggregation führen, da gegebenenfalls die Natur der Interaktionen zwischen dem nun deaggregierten LRE und anderen LREs eine Anwendung der Partiellen Deaggregation erlaubt (vgl. rechte Seite der Abbildung 3.9).

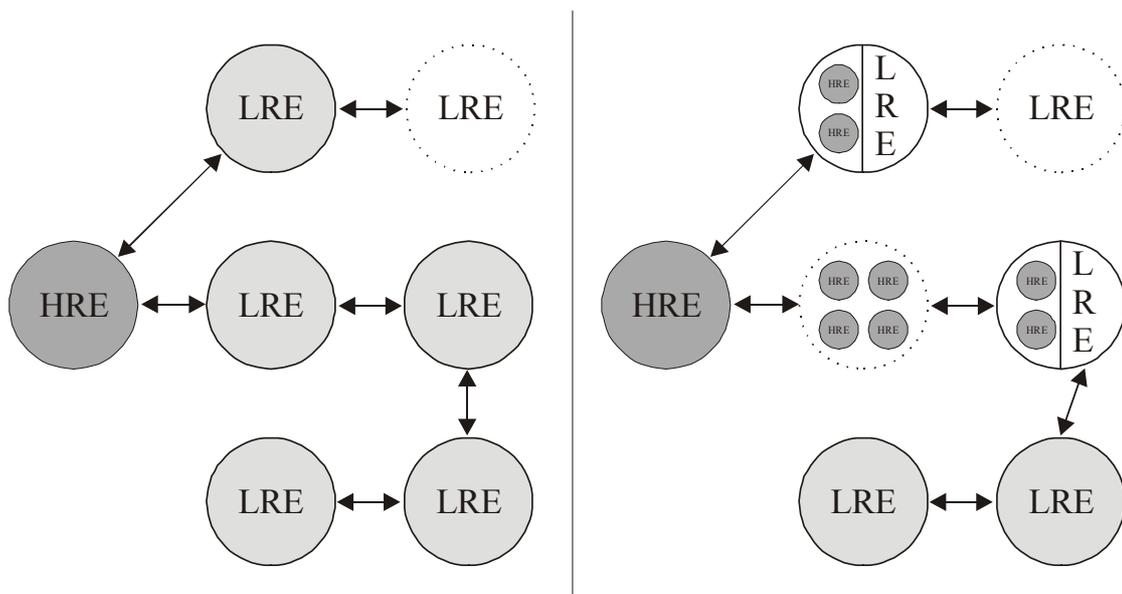


Abbildung 3.9: Partielle Deaggregation nach [Reynolds et al. 97]

⁶⁶ Im Englischen auch als *Partial Disaggregation* bezeichnet.

3. **Verwendung von Deaggregationsbereichen (Playbox):** Bei der Verwendung des Cross Resolution Modeling ist die Entscheidung wann eine Aggregation bzw. Deaggregation stattfindet mit ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes. Bisher wurde davon ausgegangen, dass eine Aggregation/Deaggregation immer dann ausgelöst wird, sobald ein LRE mit einem HRE in Kontakt tritt. Das Verfahren der Verwendung sogenannter Deaggregationsbereiche weicht von dieser Annahme ab, indem innerhalb der simulierten Modellrealität explizite Bereiche definiert werden. Betritt ein Objekt einen solchen Bereich, wird es automatisch deaggregiert. Verlässt es ihn wieder, findet eine Aggregation statt. Deaggregationsbereiche können grundsätzlich innerhalb jeder Dimension der simulierten Realität definiert werden, d.h. es sind sowohl raum- als auch zeitbezogene Deaggregationsbereiche vorstellbar. Bei Verwendung zeitbezogener Deaggregationsbereiche werden Objekte bei Erreichen eines bestimmten simulierten Zeitpunkts deaggregiert und nach Verstreichen einer vorgegeben Zeitspanne wieder aggregiert. Diese Art des Deaggregationsbereichsverfahrens bietet sich vor allem an, wenn innerhalb eines simulierten Gefechts die Geschehnisse zu besonderen Zeitpunkten oder in speziellen Zeiträumen von wesentlichem Interesse sind und deshalb mit höherer Auflösung simuliert werden sollen. Raumbezogene Deaggregationsbereiche definieren dagegen bestimmte Geländeauschnitte innerhalb des modellierten Gefechtsfelds. Betritt ein Objekt solche Gebiete, wird es deaggregiert, seine Aktionen hochauflösend modelliert und bei Verlassen des Gebietes wieder aggregiert. Dieses Verfahren bietet sich an, um im Rahmen großer aggregiert simulierter Gefechtsfelder die Geschehnisse innerhalb von Geländebereichen von besonderem Interesse oder besonderer Bedeutung (z.B. Ortschaften, Brücken, etc.) hochauflösend abzubilden, ohne eine hochauflösende Modellierung des gesamten Gefechts und -feldes notwendig zu machen. Die Verwendung räumlicher Deaggregationsbereiche birgt allerdings die Gefahr der Auflösungsoszillation, wenn Objekte sich an den Grenzen der definierten Bereiche bewegen.

Verwendung fand das Verfahren räumlicher Deaggregationsbereiche bisher zum Beispiel mit Erfolg in der von [Karr, Root 94] beschriebenen Kopplung des aggregierten Simulationsmodells EAGLE⁶⁷ mit dem verteilten virtuellen Simulationssystem SIMNET⁶⁸.

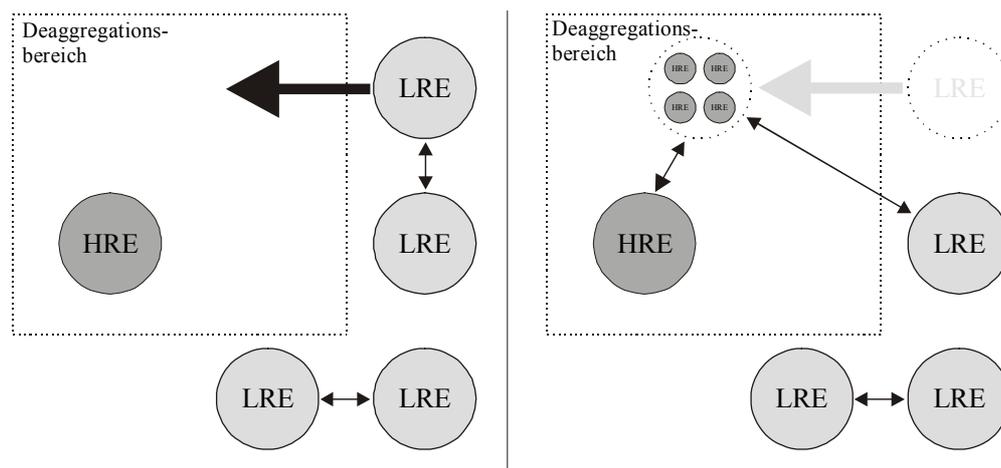


Abbildung 3.10: Verwendung räumlicher Deaggregationsbereiche nach [Reynolds et al. 97]

⁶⁷ EAGLE ist ein aggregiertes Simulationsmodell auf Korps/Divisionsebene (USA) zur Ausbildung des Personals höherer militärischer Stäbe.

⁶⁸ SIMNET ist ein Modell zur Verbindung individueller Fahrzeugsimulatoren, mit welchen einzelne Besatzungen in der Bedienung ihres Waffensystems und der Interaktion mit anderen Fahrzeugen geschult werden.

4. **Pseudo-Deaggregation** (*Pseudo-Deaggregation*⁶⁹): Bei der Benutzung des Verfahrens der Pseudo-Deaggregation geht man davon aus, dass ein HRE nur Informationen über den Zustand eines LRE benötigt, nicht aber mit ihm in Interaktion treten will.⁷⁰ Eine Deaggregation des LRE in seine atomaren HREs und die explizite Abbildung dieser HREs im Rahmen des Simulationsmodells ist in einem solchen Fall offenkundig nicht sinnvoll, da für die Simulation nur Informationen über diese Elemente, nicht aber die atomaren HREs als Objekte benötigt werden. Der Ansatz der Pseudo-Deaggregation sieht deshalb vor, dass das betroffenen LRE nicht deaggregiert wird, sondern seinen aggregierten Zustand an das HRE meldet. Das HRE selbst ermittelt dann aus diesem aggregierten Zustand die benötigten deaggregierten Informationen (vgl. Abbildung 3.11).⁷¹ Eine Abbildung der atomaren Elemente des LRE als individuelle HREs im Modell wird dadurch vermieden und der damit verbundene Rechenaufwand auf die notwendigen internen Deaggregationsberechnungen des HRE beschränkt.

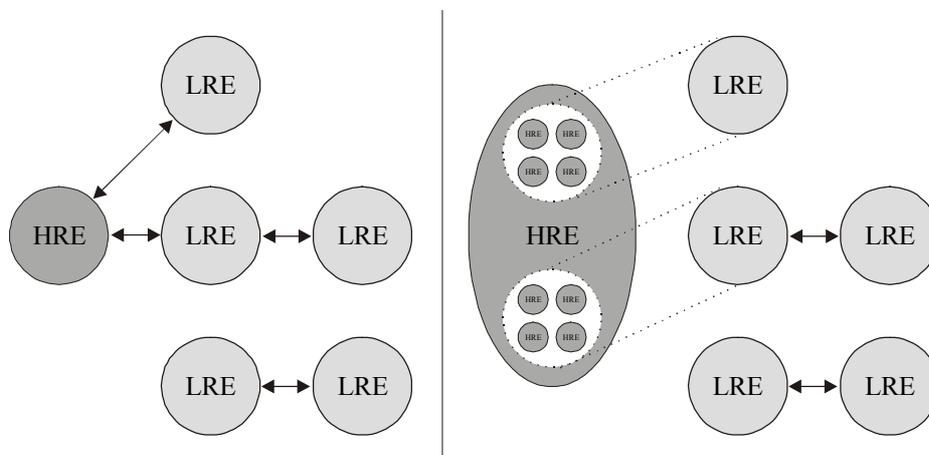


Abbildung 3.11: Pseudo-Deaggregation nach [Reynolds et al. 97]

3.3.3.4 Zusammenfassung

Das Verfahren des **Cross Resolution Modeling** zur Kopplung von Modellen unterschiedlicher Auflösungsstufe ist in einem hohen Maße von den verwendeten Aggregations- und Deaggregationsverfahren abhängig. Die Wahrung der Konsistenz sowie das Verhindern des Auftretens von Kettendeaggregation oder Auflösungsoszillation ist zumeist nur dann möglich, wenn bereits bei der Entwicklung der entsprechenden Verfahren ein besonderes Augenmerk darauf gelegt wird. Die Ansätze der Pseudo-Deaggregation, der Partiellen Deaggregation oder des Deaggregationsbereichsverfahrens sind geeignet, die Anzahl und das Ausmaß der benötigten Aggregations-/Deaggregationsvorgänge zu beschränken, können dies aber nur erreichen, wenn sie in geeigneter Weise eingesetzt werden. Schlecht definierte Partitionen im Fall der Partiellen Deaggregation oder zu groß gefasste Bereiche im Fall des Deaggregationsbereichsverfahrens können die Vorteile dieser Ansätze und damit des gesamten CRM negieren.

⁶⁹ Im Englischen auch als *Pseudo Disaggregation* bezeichnet.

⁷⁰ Ein typisches Beispiel dafür ist ein einzelnes hochaufgelöstes Objekt (z.B. Panzer), welches ein aggregiertes gegnerische Objekt (Panzerzug) aufklärt, jedoch keine weiteren Aktionen gegen dieses Objekt einleitet.

⁷¹ vgl. dazu auch [Schrickler et al. 99]

3.3.4 Der Ansatz des Variable Resolution Modeling (VRM)

3.3.4.1 Allgemeines zum Ansatz des VRM

Während das Cross Resolution Modeling⁷² sich mit der Kopplung bereits existierender Modelle unterschiedlicher Auflösungsstufen beschäftigt, ist es das primäre Ziel des in [Davis, Huber 92] beschriebenen Ansatzes des **Variable Resolution Modeling (VRM)**, ein Konzept für die Neuentwicklung von einzelnen Gefechtssimulationsmodellen bzw. Familien von Modellen vorzuschlagen, welche es dem Benutzer ermöglichen sollen, die Auflösung eines Gefechtssimulationssystems dem aktuellen Verwendungszweck – zumindest in Teilen – bedarfsgerecht anzupassen und somit die Vorteile sowohl aggregierter als auch hochauflösender Modelle zu kombinieren. Es ist leicht ersichtlich, dass der Ansatz der Neuentwicklung von Modellen mit *VRM-Fähigkeit*⁷³ gegenüber der Kopplung existierender Modelle inhärente Vorteile bietet, da im Laufe einer Neuentwicklung Art und Ausprägung der VRM-Fähigkeit durch den Modellentwickler bestimmt werden können und sich nicht an den Eigenschaften und Beschränkungen existierender Modelle orientieren müssen. Darüber hinaus bietet die Neuentwicklung im Rahmen des VRM die Möglichkeit, dass Prozessabbildungen und Schnittstellen der dabei entstehenden Modelle oder Submodelle bereits von Anfang an aufeinander abgestimmt werden und dadurch der spätere Datenaustausch in Form von Aggregations- und Deaggregationsprozessen zwischen den Modellen und unterschiedlichen Auflösungsstufen erleichtert wird.

Da eine Vielzahl denkbarer Methoden und möglicher Ausprägungen der VRM-Fähigkeit mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen existiert, kann das VRM dabei nur ein allgemeines Konzept für die Neuentwicklung entsprechender Modelle darstellen. Um dennoch Modelle beschreiben und im Rahmen des VRM klassifizieren zu können, identifizieren [Davis, Huber 92] die folgenden wesentlichen Merkmale:

1. **Möglicher Zeitpunkt des Wechsels der Auflösungsstufe:** Modelle, die im Rahmen des VRM entwickelt wurden, können in der Frage variieren, zu welchem Zeitpunkt das Wechseln der Auflösungsstufe erlaubt ist. Es sind unter anderem Modelle denkbar, welche einen Wechsel nur vor einem Simulationslauf, an bestimmten Zeitpunkten oder jederzeit während eines Simulationslaufes erlauben.
2. **Flexibilität des Wechsels der Auflösungsstufe:** Unter Flexibilität kann einerseits verstanden werden, wie viele unterschiedliche Auflösungsstufen das jeweilige Modell unterstützt. Andererseits kann aber auch die Frage der Übergangslatenzenzeiten, d.h. wie lange ein Auflösungswechsel dauert, bzw. die Anzahl der elementaren Gefechtsprozesse, welche in unterschiedlichen Auflösungsstufen modelliert werden, die Flexibilität im Sinne des VRM beeinflussen.
3. **Reversibilität des Wechsels der Auflösungsstufe:** Hierbei stellt sich die Frage, ob ein Modell sowohl das Erhöhen als auch das Verringern der Auflösung unterstützt oder ob nur eine der beiden Funktionalitäten bereitgestellt wird. Es sind durchaus Modelle denkbar,

⁷² vgl. Kapitel 3.3.3, S. 28ff

⁷³ Unter *VRM-Fähigkeit* soll im Folgenden die Tatsache verstanden werden, dass ein Modell / eine Modellfamilie die grundlegende Anforderung des Variable Resolution Modeling erfüllt, d.h. dass es mit dem dezidierten Ziel entwickelt wird, dem Benutzer einen Wechsel der Auflösung des Gesamtmodells oder zumindest einzelner Teilaspekte des Modells zu ermöglichen.

welche zwar entsprechende Aggregations- aber keine Deaggregationsverfahren zur Verfügung stellen.

4. **Einzelmodell oder Modellfamilie:** VRM kann sowohl im Rahmen eines einzelnen Modells als auch durch eine Familie von Modellen realisiert werden, bei der jedes Modell eine bestimmte Auflösungsstufe abbildet.
5. **Güte der VRM-Fähigkeit:** Unter dem Begriff der Güte soll hierbei verstanden werden, auf welche Weise und in welchem Umfang Konsistenz zwischen den unterschiedlichen Stufen der Auflösung hergestellt und gewährleistet wird. Die Frage nach der Konsistenz in der Wahrnehmung des Benutzers⁷⁴ kann hierbei auch eine Rolle spielen.

Betrachtet man bereits existierende Modelle bzw. Modellfamilien mit zumindest teilweiser VRM-Fähigkeit, so lassen sich besonders die folgenden generellen Ansätze von Modellentwicklern bei der Umsetzung des VRM identifizieren:

- (a) Modelle mit der Möglichkeit *Selektiver Betrachtung*,
- (b) Modelle mit alternativen *Submodellen unterschiedlicher Auflösung* und
- (c) Modelle mit *integrierten Prozesshierarchien*.

Die einzelnen Ansätze unterscheiden sich in der verwendeten Methodik und somit in dem Umfang, in welchem das jeweilige Modell anhand der aufgestellten Kriterien als VRM-fähig zu bewerten ist. Im Folgenden sollen die Ansätze nun kurz vorgestellt und ihre VRM-Fähigkeit diskutiert werden.

3.3.4.2 Selektive Betrachtung

Unter Modellen mit selektiver Betrachtung versteht man Gefechtssimulationsmodelle, welche dem Benutzer einen aggregierten Blick auf das Gefechtsgeschehen ermöglichen, dieses jedoch intern weiterhin mit einer höheren Auflösung abbilden (vgl. Abbildung 3.12). Bei der Diskussion der Bedeutung aggregierter Gefechtssimulationsmodelle⁷⁵ wurde bereits darauf hingewiesen, dass sie aufgrund der einfacheren Abbildung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen dem menschlichen Benutzer die Analyse der Simulationsergebnisse erleichtern. Die Methode der selektiven Betrachtung verknüpft diesen Vorteil aggregierter Modelle mit der detaillierteren Abbildung eines hochauflösenden Modells, indem es dem Benutzer eine aggregierte und damit vereinfachte Betrachtung der komplexen Prozesse und Daten eines Simulationsmodells höherer Auflösung ermöglicht. Dieser Ansatz kann sich jedoch als problematisch erweisen, da die durch den Benutzer aggregiert wahrgenommenen Prozesse nicht mit der intern ablaufenden höherauflösenden Prozessmodellierung übereinstimmen. Werden etwa Parameter, welche einen signifikanten Einfluss auf das Prozessgeschehen haben, in der aggregierten Darstellung nicht abgebildet und deren Bedeutung für den Benutzer damit nicht transparent gemacht, so kann dies zu einer falschen Vorstellung über die modellierten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und einer fehlerhaften Analyse der Simulationsergebnisse führen.⁷⁶ Zusätzlich muss festgestellt werden, dass hochauflösende Modelle mit selektiver Betrachtung gegenüber real aggregierten Modellen zwar den Vorteil einer leichteren Deutung von Simulationsergebnissen übernommen haben, weitere Vorteile aggregierter Modelle je-

⁷⁴ vgl. „Problem der Übergangslatenzzeiten“, Kapitel 3.3.3.2, S. 28ff

⁷⁵ vgl. Kapitel 3.2.2, S. 19f

⁷⁶ [Davis, Huber 92] bezeichnen dies als Problem der *Hidden Variables*.

doch nicht nutzen können. Ein Modell mit selektiver Betrachtung verfügt zum Einen nicht über die geringere Komplexität eines aggregierten Modells und kann somit dessen Laufzeitvorteile nicht erreichen. Zum Anderen erleichtert die selektive Wahrnehmung die Behandlung unscharfer Fragestellungen ebenfalls nur sehr eingeschränkt, da ausschließlich eine aggregierte Darstellung des simulierten Gefechts möglich ist, die Prozesse intern jedoch weiterhin mit höherer Auflösung abgebildet werden und deshalb keine aggregierten Eingabedaten verarbeiten können. Der Benutzer ist somit weiterhin auf die Bereitstellung von Parametern mit einer hohen Auflösung und auf die Übersetzung seiner unscharfen Fragestellung in deren komplexe Zusammenhänge angewiesen.

Der Ansatz der Selektiven Betrachtung stellt folglich nur eine erste primitive Form des VRM dar, muss jedoch zusammenfassend als wenig flexibel und aufgrund der beschriebenen Problematik versteckter Einflussgrößen sogar unter Umständen als irreführend bewertet werden.

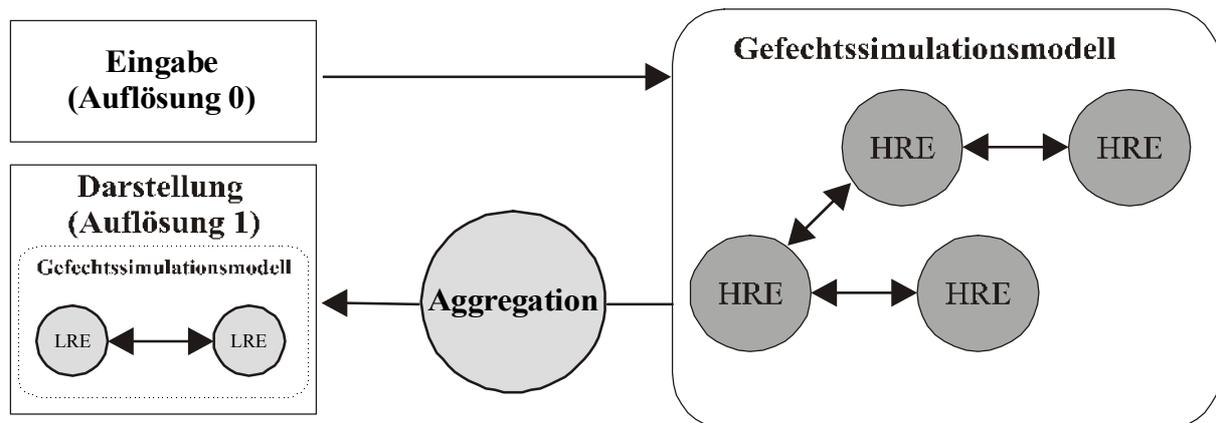


Abbildung 3.12: Darstellung eines Modells mit selektiver Betrachtung. Die Darstellung erfolgt aggregiert (Auflösung 1), die Modellierung und Eingabe der Parameter mit höherer Auflösung (Auflösung 0).

3.3.4.3 Alternative Submodelle

Während bei Modellen mit selektiver Betrachtung innerhalb des Modells kein wirklicher Wechsel der Auflösung stattfindet, sondern dies dem Benutzer durch eine aggregierte Darstellung nur suggeriert wird, verfügen Modelle / Modellfamilien dieser Gruppe für gewisse Teilaspekte des abgebildeten Gefechtsgeschehens über mehrere alternative Submodelle, welche diese Prozesse mit unterschiedlicher Auflösung abbilden. Der Benutzer wird dadurch in die Lage versetzt, für diese Prozesse die dem jeweiligen Analyse- / Einsatzzweck angemessene Auflösung der Modellierung durch die Auswahl eines Submodells zu bestimmen. Die derart variabel modellierten Teilaspekte können dabei nur einzelne Prozesse, wie etwa Abnutzung, Aufklärung oder Bewegung (vgl. Beispiel 1), oder aber auch größere Teile des Gefechtsgeschehens, etwa Logistik- oder Luftkriegskomponenten (vgl. Beispiel 2), im Ganzen umfassen.

Beispiel 1: Im Rahmen eines Simulationsmodells existieren zwei alternative Submodelle zur Abbildung der Abnutzungsprozesse. Submodell A1 bildet Abnutzungsprozesse zwischen gegnerischen Waffensystemen mit Hilfe einer hochauflösenden Einzelschusssimulation ab, welche wesentliche Kenndaten der verwendeten Systeme sowie Gelände- und Witterungseinflüsse berücksichtigt. Submodell B1 dagegen verwendet einen aggregierten Ansatz auf der Basis eines Lanchestermodells⁷⁷.

⁷⁷ vgl. Kapitel 4.2, S. 51ff

Beispiel 2: *Man betrachte ein Simulationsmodell, welches das Geschehen im Gefechtsabschnitt einer verteidigenden Brigade inklusive der zugehörigen logistischen Prozesse abbildet. Das Modell verfügt dazu über zwei alternative Submodelle. Submodell A2 bildet diese Prozesse sehr detailliert ab, d.h. die Versorgung mit Munition, Betriebsstoff und anderen Bedarfsgütern sowie das Bergen und Instandsetzen beschädigter Waffensysteme werden mit dem dazu benötigten Personal und Material explizit abgebildet. Submodell B2 bildet diese Prozesse dagegen nur sehr vereinfacht ab. Die Versorgung mit Nachschub sowie Instandsetzungsbestrebungen werden nur durch entsprechend angepasste Zuwachsraten der Munitions-/Betriebsstoffvorräte und Waffensystemzahlen der Einheiten abgebildet.*

Die Verwendung alternativer Submodelle unterschiedlicher Auflösungsstufen ist gut geeignet, innerhalb eines Modells / einer Modellfamilie dem Benutzer die Vorteile sowohl hochauflösender als auch aggregierter Modellierung anzubieten. Durch die Möglichkeit einzelne Prozesse / Teilaspekte innerhalb des Gefechts wahlweise aggregiert bzw. hochauflösend abzubilden, lässt sich etwa der Einfluss dieser Prozesse auf andere Prozesse und damit auf das gesamte Geschehen strukturiert untersuchen. Eine Sensitivitätsanalyse einzelner Teilaspekt oder Eingabedaten wird somit unterstützt. Erinnert man sich der beschriebenen Vorteile aggregierter Modelle, so liegt ein weiterer Vorteil in der Möglichkeit, nur solche Submodelle hochauflösend arbeiten zu lassen, für welche die benötigten Eingabedaten existieren. Die restlichen Prozesse können dagegen durch aggregierte Submodelle abgebildet werden, bis für sie ebenfalls valide hochauflösende Eingabedaten gefunden wurden. Man ist somit also nicht gezwungen, bei der Modellentwicklung in hohem Maße auf die jeweilige Verfügbarkeit von Daten Rücksicht zu nehmen, sondern kann entsprechende hochauflösende Submodelle bereits integrieren und damit spätere Modellanpassungen vermeiden.

Der Einsatz alternativer Submodelle ist jedoch auch mit Nachteilen verbunden, welche vor allem dann zu Tage treten, wenn in der Entwicklungsphase des Modells nicht genug Augenmerk auf die Integration der einzelnen Submodelle innerhalb eines umfassenden Modellgerüsts gelegt wurde. Gerade bei eng verzahnten Prozessen und Teilaspekten des Gefechtsgeschehens kann es offensichtlich zu Problemen kommen, wenn diese durch jeweils eigene Submodelle auf stark unterschiedlichen Auflösungsstufen abgebildet werden.⁷⁸ Entsprechend flexible multidirektionale Aggregations- und Deaggregationsmechanismen (vgl. Abbildung 3.13), welche die gegenseitigen Abhängigkeiten dieser Prozesse berücksichtigen und damit die Konsistenz des Modells sicherstellen – auch bei Wechsel eines Submodells oder stark asymmetrischen Auflösungsstufen verzahnter Submodelle – sind deshalb an den Schnittstellen zwischen den Submodellfamilien einzelner Prozesse unbedingt notwendig.

Eine genauere Bewertung der Verwendung von Submodellen unterschiedlicher Auflösung zur Erlangung der VRM-Fähigkeit muss jedoch immer als Einzelfallbetrachtung eines Modells anhand der von [Davis, Huber 92] genannten Kriterien geschehen. Gerade die Fragen nach

- der *Flexibilität*, etwa in Form der Anzahl alternativer Submodelle für einen Teilaspekt oder Prozess,

⁷⁸ Man stelle sich hierbei etwa ein Modell vor, innerhalb dessen eine hochauflösende Einzelschusssimulation die Abnutzungsprozesse zwischen einzelnen Waffensystemen sowie ein aggregiertes Modell die Aufklärung nur zwischen ganzen Einheiten (z.B. Kompanien) abbildet. Die Vorzüge der Einzelschusssimulation können in einem solchen Fall nicht im vollen Maße zur Geltung kommen, da nicht für jede mögliche Waffensystempaarung unabhängig entschieden wird, wann eine Aufklärung stattgefunden hat, sondern dies nur pauschal für zwei Einheiten geschieht. Ein entsprechendes Lanchestermodell wäre zur Interaktion mit diesem Aufklärungssubmodell gegebenenfalls angemessener.

- der *Reversibilität*, also der Frage ob alternative Submodelle beliebig ausgetauscht werden können und somit sowohl eine Erhöhung als auch ein Verringern der Auflösung möglich ist, sowie
- die Frage nach den *möglichen Zeitpunkten* für einen Austausch von Submodulen

sind neben der zentralen Problematik der Konsistenzwahrung ausschlaggebend für eine solche Bewertung.

Es lässt sich deshalb zusammenfassend feststellen, dass der vorgestellte Submodell-Ansatz einerseits eine geeignete Methode darstellt, Modelle / Modellfamilien mit VRM-Fähigkeit zu realisieren. Der Umfang, in dem er dies erreicht, hängt aber zu einem großen Teil von der einzelnen Umsetzung im Modell ab. Grundsätzlich muss man jedoch festhalten, dass der Submodell-Ansatz dieses Ziel sinnvoll nur erreichen kann, wenn eine besondere Aufmerksamkeit bei der Entwicklung auf den Entwurf der einzelnen Submodelle sowie geeigneter Aggregations- / Deaggregationsschnittstellen gerichtet wird.

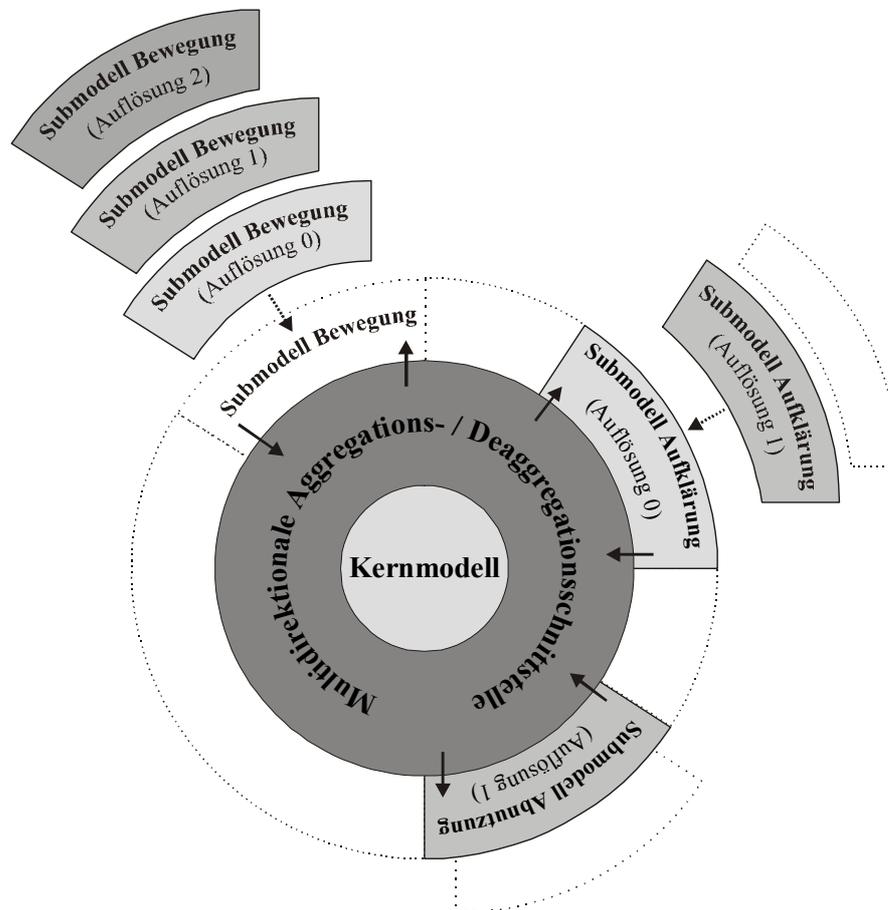


Abbildung 3.13: VRM durch Bereitstellung alternativer Submodelle mit unterschiedlicher Auflösung für einzelne Prozesse

3.3.4.4 Integrierte Prozesshierarchien variabler Auflösung⁷⁹

Die Modelle der letzten Gruppe realisieren den im Rahmen von [Davis, Huber 92] und weiteren späteren Arbeiten⁸⁰ zum VRM hauptsächlich gewählten Ansatz der Verwendung von integrierten Prozesshierarchien variabler Auflösung. Dieses Konzept nutzt die Erkenntnis, dass wesentliche Prozesse auf unterschiedlichen Stufen der Auflösung untereinander in hierarchischen Abhängigkeitsbeziehungen stehen, d.h. die Ergebnissen hochauflösender Prozesse als Eingabedaten aggregierter Prozesse dienen. Im Rahmen dieses Ansatzes wird der Modellbenutzer nun in die Lage versetzt, angepasst an den Fokus und die Größenordnung der jeweiligen Fragestellung einer Analyse zu entscheiden, auf welcher Ebene der Prozesshierarchie das System mit der expliziten Simulation der Prozesse beginnen soll bzw. welche Prozessebenen höherer Auflösung durch die Bereitstellung vorbestimmter Eingabedaten für die jeweils nächste aggregierter Ebene ausgeschaltet werden. Am Beispiel der in Abbildung 3.14 dargestellten Prozesshierarchie soll dieser Ansatz verdeutlicht werden:

Ein Gefechtssimulationssystem verwendet in seiner Modellierung des Abnutzungsprozesses den aggregierten Wert der Schadenserwartung (DE)⁸¹, der durch den Prozess „Berechnung DE“ ermittelt wird. Die Berechnung der Schadenserwartung verwendet das Ergebnis des höher auflösenden Subprozesses „Berechnung SSPK“⁸². Dieser Prozess wiederum basiert auf den Ergebnissen der Subprozesse „Berechnung CEP“⁸³ und „Berechnung Lethalradius“, welche auf einer nochmals höheren Ebene der Auflösung stattfinden. Als letztes basiert die Berechnung des Lethalradius auf dem Subprozess „Berechnung Sprengkraft“ sowie die Berechnung des CEP auf dem Subprozess „Berechnung CEP(Entfernung)“. Der Modellnutzer hat in dieser Situation nun die Möglichkeit die Durchführung einzelner Subprozesse durch die direkte Angabe der entsprechenden Eingabewerte für die Prozesse, welche auf ihnen basieren, auszuschalten. Er könnte sich somit etwa entscheiden, einen generischen Wert für den Lethalradius vorzugeben und dadurch auf die situationsabhängige, detailliertere aber deshalb auch komplexere Berechnung anhand von Sprengkraft, Detonationshöhe und Geländekonturen während eines Simulationslaufes zu verzichten. Eine maximal aggregierte Betrachtung des Prozesses wäre somit durch die direkte Angabe eines vorbestimmten Wertes für die Schadenserwartung und Verzicht auf sämtliche darunter liegende Subprozesse möglich. Der gegenteilige Fall der Betrachtung mit höchst möglicher Auflösung kann durch Berechnung der Ergebnisse der Subprozesse der Ebene 1 (vgl. Abbildung 3.14) während eines Simulationslaufes erreicht werden.

Betrachtet man dieses Verfahren nun anhand der vorgestellten Bewertungsmerkmale, so wird deutlich, dass es das Erreichen einer hohen Ausprägung der VRM-Fähigkeit in einem Modell ermöglicht. Besonders die *Güte der VRM-Fähigkeit* profitiert von der Tatsache, dass zur Wahrung der Konsistenz notwendige Aggregationsvorschriften in Form der abgebildeten Prozesshierarchien integraler Bestandteil des Ansatzes sind. Die für die Gesamtbeurteilung ebenfalls interessante Ausprägung der *Flexibilität der VRM-Fähigkeit* resultiert primär aus der Anzahl unterschiedlicher Ebenen (vgl. Abbildung 3.14) der Prozesshierarchie, welche im je-

⁷⁹ In [Davis, Huber 92] englisch als *Integrated Hierarchical Variable Resolution* (IHVR) bezeichnet.

⁸⁰ vgl. etwa [Davis, Bigelow 98] oder [Davis et al. 2000]

⁸¹ Unter Schadenserwartung (*Damage Expectancy*) soll hier der Gesamtschaden verstanden werden, welcher erwartungsgemäß entsteht, wenn eine vorgegebene Anzahl von Waffensystemen eines Typs auf ein Ziel feuern.

⁸² SSPK = *Single Shot Probability of Kill*: bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein Waffensystem des gegebenen Typs ein Ziel mit einem Schuss neutralisiert.

⁸³ CEP = *Circular Error Probable*: bezeichnet den Radius um den Zielpunkt, in welchem erwartungsgemäß 50% aller Treffer liegen.

weiligen Modell abgebildet werden, und somit aus einer Entscheidung des Entwicklers. Sie kann aber andererseits auch Beschränkungen durch die spezifische Natur der abgebildeten Prozesse unterliegen, da diese Prozesse selbst bzw. das Wissen des Modellentwicklers über sie unter Umständen nur die Identifizierung einer beschränkten Zahl von Hierarchieebenen erlaubt.

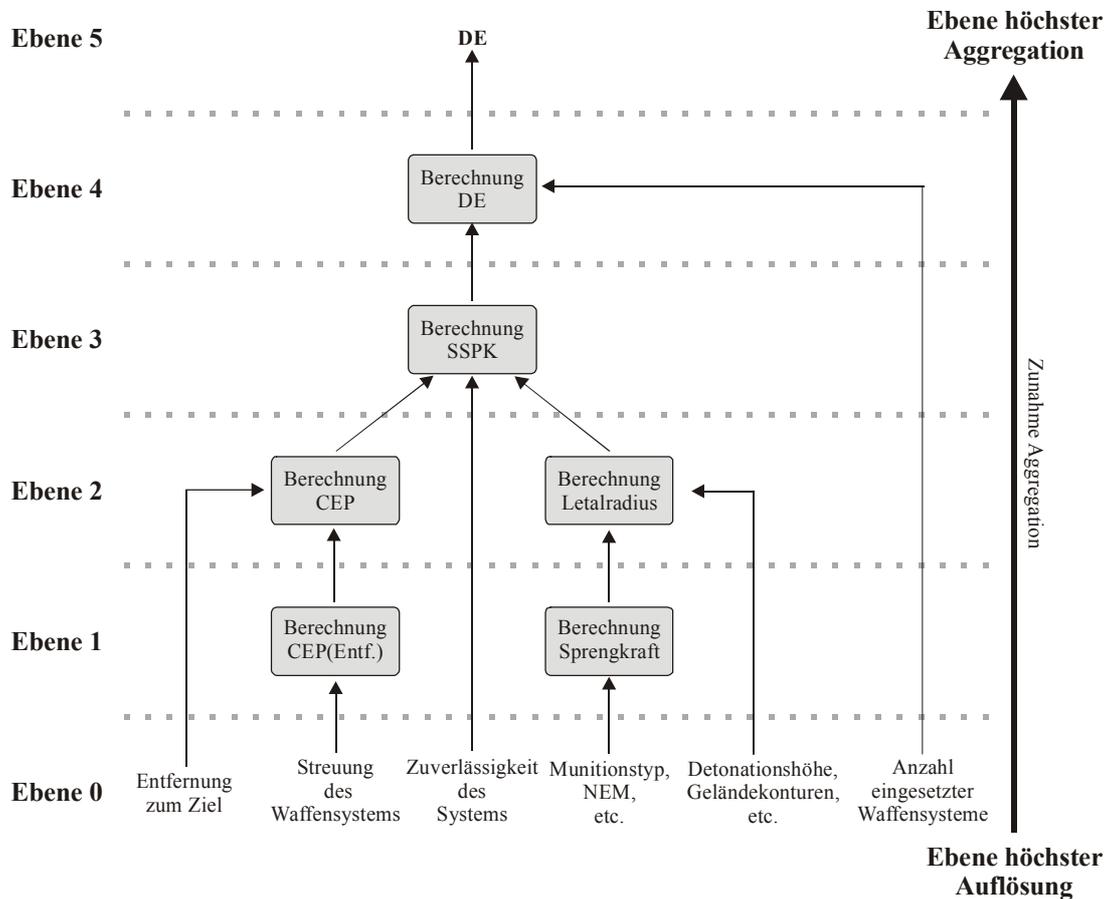


Abbildung 3.14: Darstellung einer Prozesshierarchie am Beispiel der Berechnung der Schadenserwartung (DE) nach [Davis, Huber 92]

Es muss darüber hinaus festgestellt werden, dass das volle Potential dieses Ansatzes nur dann erreicht werden kann, wenn sowohl bei der Entwicklung als auch in der Anwendung derartiger Modelle besondere Aufmerksamkeit auf die Identifizierung der Struktur entsprechender Prozesshierarchien gelegt wird. Neben dieser Forderung besitzt der Ansatz jedoch auch inhärente Problempunkte, welche die Entwicklung und den Einsatz entsprechender Modelle erschweren können. Als zentrale Probleme lassen sich dabei unter anderem identifizieren:

- (a) Fragen der Deaggregation,
- (b) Seiteneffekte,
- (c) verteilte Prozesse sowie
- (d) Konflikte mit modernen Programmierparadigmen (z.B. OOP⁸⁴)

⁸⁴ OOP = Objektorientierte Programmierung

Sie sollen im Folgenden kurz betrachtet werden.

Während die abgebildeten Prozessstrukturen per se Vorschriften für Aggregationsprozesse zwischen den einzelnen Hierarchieebenen darstellen, kann der beschriebene Ansatz im Normalfall keinen Anhalt für dazu komplementäre Deaggregationsprozesse bieten. Die Reversibilität des Wechsels der Auflösungsstufe ist somit grundsätzlich nicht gegeben. Eine *Deaggregation* der Ergebnisse aggregierter Prozesse in die Ergebnisse der höher auflösenden, unterliegenden Subprozesse ist also nur dann möglich, wenn neben der hierarchischen und als „bottom-up-System“ zu charakterisierenden Prozessstruktur explizite Deaggregationsalgorithmen angegeben werden. Die Verwendung dieses Ansatzes bietet sich deshalb primär im Rahmen von Analysen an, bei denen eine Notwendigkeit zur späteren Deaggregation von Ergebnissen nicht zu erwarten bzw. der Nutzer in der Lage ist, die Analyse bei Bedarf mit einem nachträglich benötigten höheren Auflösungsgrad zu wiederholen.

Das Problem der *Seiteneffekte* resultiert aus der dem Ansatz zugrunde liegenden Annahme strikt hierarchischer Prozessstrukturen. Im Gegensatz zu dieser Annahme verfügen in der militärischen Realität einzelne Prozesse jedoch oft über Querbeziehungen und wechselseitige Abhängigkeiten, welche durch eine rein hierarchische Baumstruktur nicht erfasst werden können. Tritt etwa der Fall auf, dass das Berechnungsergebnis eines Subprozesses für mehrere übergeordnete Prozesse relevant ist (vgl. Abbildung 3.15), so hat offensichtlich die Entscheidung einen der beiden Prozesse nur aggregiert zu betrachten, d.h. auf die explizite Berechnung des Subprozesses zu verzichten, notwendigerweise eine direkte Auswirkung auf die Auflösung, mit welcher der zweite Prozess abgebildet wird. Der Ansatz, in einem derartigen Fall den besagten Subprozess für den zweiten übergeordneten Prozess weiterhin explizit abzubilden und somit einerseits in der Modellierung des ersten Prozesses aggregierte Eingabewerte, in der Modellierung des zweiten Prozesses dagegen die resultierenden Berechnungsergebnisse des Subprozesses zu verwenden, muss zur Lösung dieses Problems als ungeeignet bewertet werden, da dies zu einer Inkonsistenz der Abbildung des Subprozesses in den beiden übergeordneten Prozessen und damit innerhalb des Gesamtmodells führen kann. Der dazu alternative Ansatz, den entscheidenden Subprozess zwangsweise weiterhin explizit abzubilden und die Berechnungsergebnisse zu nutzen, führt dagegen dazu, dass die Entscheidung des Benutzers einen Prozess nur aggregiert zu betrachten negiert wird, da dann konsequenterweise alle übergeordneten Prozesse, welche auf dem Ergebnis des Subprozesses basieren, ebenfalls explizit abgebildet werden müssen, um die bereits beschriebenen Konsistenzprobleme zu vermeiden. Als denkbarer Lösungsansatz verbleibt somit nur die Möglichkeit auch den zweiten Prozess aggregiert abzubilden, d.h. auch hier die entsprechenden aggregierten Eingabewerte als Ersatz für die explizite Abbildung des Subprozesses zu verwenden. Es wird deutlich, dass im Falle des Vorliegens von Querverbindungen zwischen den Subprozessen unterschiedlicher übergeordneter Prozesse mit der Entscheidung zur aggregierten Betrachtung eines Prozesses automatisch auch die Auflösung eventuell verbundener Prozesse vermindert wird, sobald die relevanten Subprozesse durch die Aggregation betroffen sind. Dieser Tatsache muss notwendigerweise bereits bei der Modellentwicklung Rechnung getragen werden, indem die Auflösungen querverbundener Prozesse in geeigneter Weise gekoppelt werden. Die theoretisch durch das Verfahren integrierter Prozesshierarchien variabler Auflösung für den Modellnutzer erreichbare Flexibilität wird dadurch jedoch eingeschränkt.

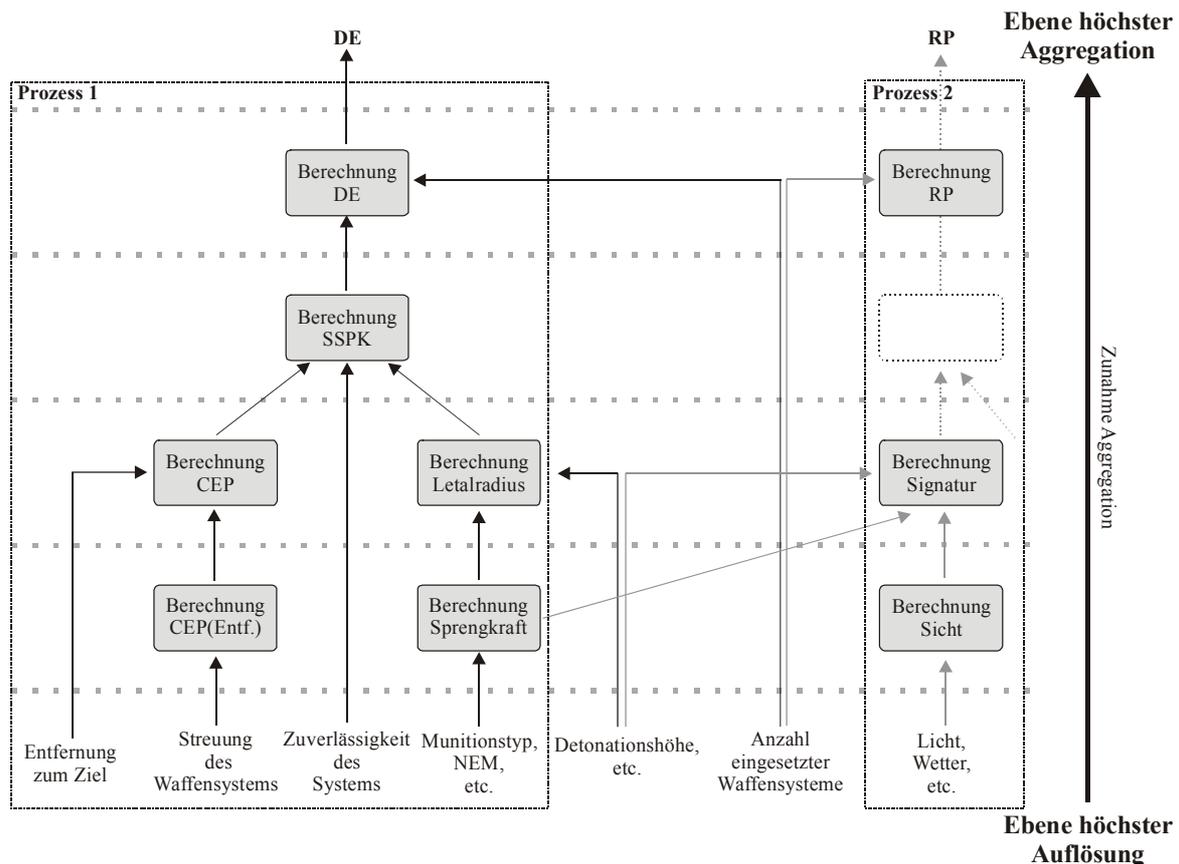


Abbildung 3.15: Darstellung von Seiteneffekten in Prozesshierarchien am Beispiel der Prozesse „Ermittlung DE“ und „Ermittlung RP“⁸⁵

Das Problem *verteilter Prozesse* betrifft die mögliche Diskrepanz zwischen der konzeptionellen, teils monolithischen Vorstellung des Modellnutzers über Prozessstrukturen einerseits und der konkreten, oftmals verteilten Umsetzung dieser Strukturen im Rahmen des Entwurfs und der Implementierung eines Modells durch den Entwickler andererseits. Diese Diskrepanz kann vor allem zu Tage treten, wenn der Modellnutzer im Rahmen einer Analyse einzelne Prozesse des Gefechtsgeschehens aggregiert betrachten möchte und somit gezwungen ist, festzulegen, welche Subprozesse er durch direkte Angabe aggregierter Eingabedaten ausschalten möchte. Dies setzt jedoch auf Seiten des Nutzers ein umfassendes Verständnis über die realisierte Abbildung der Prozessstrukturen im Modell voraus. [Davis, Huber 92] führen als illustratives Beispiel für diese Tatsache den Prozess der *Abnutzung bodengebundener Kräfte* an.⁸⁶ Die Abnutzung eigener bodengebundener Kräfte kann durch einen Nutzer durchaus als geschlossener Prozess verstanden werden, besteht innerhalb eines Modells jedoch normalerweise aus einer Vielzahl unterschiedlicher und weitestgehend eigenständiger Prozesse, wie etwa der Abnutzung durch andere bodengebundene Kräfte, der Abnutzung durch Sperren oder der Abnutzung durch taktische bzw. unter Umständen auch strategische Luftstreitkräfte, welche in der Summe ihrer Ergebnisse den betrachteten Prozess bilden. Im Falle der Entscheidung, den Prozess der Abnutzung bodengebundener Kräfte stärker aggregiert abzubilden, ist der Nutzer somit gezwungen, von seiner monolithischen Betrachtung des Prozesses abzurücken und die Prozessstrukturen bzw. das Zusammenwirken der unterschiedlichen im Modell verteilten Prozesse zu beachten, um so die Entscheidung zur Aggregation im

⁸⁵ RP = *Reconnaissance Probability*: bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein Waffensystem durch ein fremdes Sensorsystem aufgeklärt wird.

⁸⁶ vgl. [Davis, Huber 92], S. 31

Rahmen des beschriebenen Ansatzes der Prozessstrukturen in geeigneter Weise umsetzen zu können. Geschieht das nicht oder nur unzureichend, d.h. werden die Einzelprozesse, welche in ihrer Gesamtheit den Prozess der Abnutzung bilden, mit stark unterschiedlichen Auflösungen abgebildet, besteht die Gefahr des Auftretens von Inkonsistenzen in der Abbildung, wie sie bereits bei dem Problem der Seiteneffekte beschrieben wurden.

Ein weiteres Problem kann sich bei der Umsetzung des beschriebenen Ansatzes in modernen Entwicklungsumgebungen und hier besonders bei der strikten Berücksichtigung *objektorientierter Programmierparadigmen* ergeben. Einerseits fördert und unterstützt besonders die objektorientierte Programmierung die Modularisierung und Abstraktion in Form von Klassenhierarchien sowohl bereits im Rahmen des Entwurfs als auch während der anschließenden Implementierung eines Modells. Während jedoch der Ansatz der integrierten Prozesshierarchien variabler Auflösung sich bei der Aufstellung der Hierarchien einzig an der Zugehörigkeit von Subprozesse zu übergeordneten Prozessen orientiert (vgl. Abbildung 3.14), werden im Rahmen der objektorientierten Programmierung Subprozesse typischerweise in den Objektklassen zusammengefasst, welche für ihre Durchführung verantwortlich sind. Subprozesse, welche aus prozessorientierter Sichtweise zusammengehören, sind unter Umständen auf unterschiedliche Klassen, d.h. Module, verteilt.

Anhand des bereits bekannten einfachen Beispiels der Ermittlung der Schadensermittlung (DE) kann dieser Effekt illustriert werden (vgl. Abbildung 3.16):

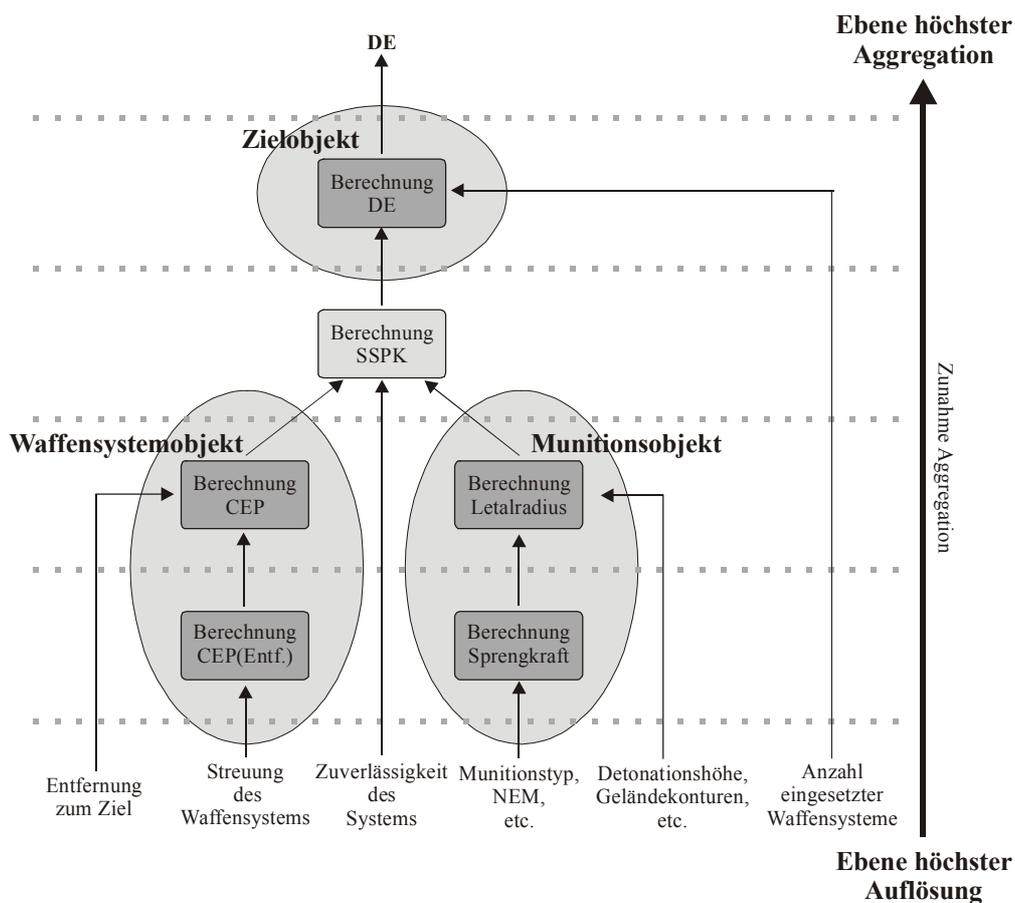


Abbildung 3.16: Darstellung der Kollision zwischen prozessorientierter Hierarchie und Klassenstrukturen der objektorientierten Programmierung (Ovale illustrieren, welche Subprozesse typischerweise zu einzelnen Objektklasse gehören würden.)

*Betrachtet man die einzelnen Subprozesse, so lassen sich in leicht nachvollziehbarer Art und Weise beispielhafte Objektklassen identifizieren, zu denen diese – in einem streng objektorientierten Programm – jeweils gehören würden. „**Berechnung CEP(Entf.)**“ und „**Berechnung CEP**“ sind typische Methoden, welche ein Waffensystemobjekt auf der Basis seiner charakteristischen Daten (z.B. Streuverhalten) zur Verfügung stellen muss. Die Subprozesse „**Berechnung Sprengkraft**“ sowie „**Berechnung Letalradius**“ basieren primär auf den Daten des jeweiligen Munitionstyps und müssten somit durch eine entsprechende Klasse Munitionsobjekt realisiert werden. Die Berechnung der Schadenserwartung „**Berechnung DE**“ zuletzt, muss bei strikter objektorientierter Programmierung durch ein Zielobjekt passieren, da einzig das Ziel selbst aufgrund seiner Daten (z.B. Typ, Panzerung, etc.) und der Tatsache eines Einschlags der berechneten Wirkungskraft entscheiden kann, von welcher Art und welchem Umfang der angeordnete Schaden jeweils ist.*

Bereits in diesem einfachen Beispiel werden die Subprozesse einer einzelnen Prozesshierarchie somit auf mindestens drei verschiedene Objektklassen verteilt und deshalb in unterschiedlichen Modulen implementiert. Die aus dieser Tatsache resultierenden Effekte entsprechen weitestgehend dem bereits beschriebenen Problem der *verteilten Prozesse*, d.h. der Nutzer muss über ein detailliertes Wissen bezüglich der Art der Implementierung und der konkreten Verteilung der Subprozesse im Modell verfügen, um etwa im Falle der Aggregation Inkonsistenzen zu vermeiden.

3.3.4.5 Zusammenfassung

Als zentraler Vorteil des Variable Resolution Modeling (VRM) kann zusammenfassend der Ansatz der gezielten Neuentwicklung von Modellen bzw. Modellgruppen mit der zentralen Fähigkeit zum bedarfsangepassten Wechsel der Auflösungsstufe und der damit verbundene Verzicht auf die Kopplung bereits existierender Modelle unterschiedlicher Auflösungsstufe bewertet werden. Im Rahmen einer solchen Neuentwicklung verfügt der Modellentwickler über deutlich bessere Möglichkeiten und größere Freiheitsgrade, das Problem der Konsistenzwahrung durch die Integration effektiver und auch systemressourcensparender Aggregations- bzw. Deaggregationsmechanismen – angepasst an den Verwendungszweck des Modells – zu behandeln. Zusätzlich kann durch diese Vorgehensweise sichergestellt werden, dass das Modell den Ansprüchen der geplanten Analyse entspricht und nicht etwa die Analyse den Fähigkeiten und Restriktionen existierender Modelle angepasst werden muss. Dieser Ansatz stellt dazu natürlich erhebliche zusätzliche Anforderungen an den Modellentwickler, welcher in der Lage sein muss, das Zusammenwirken einer Vielzahl komplexer Prozesse nun auch vor dem Hintergrund unterschiedlicher Auflösungsstufen zu koordinieren.

Die möglichen VRM-Varianten der „Selektiven Betrachtung“, „Alternativer Submodelle“ und „integrierter Prozesshierarchien variabler Auflösung“ erlauben es, die VRM-Fähigkeit in unterschiedlicher Güte und Flexibilität zu realisieren. Auch hier ist es aber nicht zielführend, eine der dargestellten Varianten als generelles Mittel der Wahl darzustellen. Vielmehr sollte im Rahmen eines Modellbildungsprozesses stets primär festgestellt werden, welche Ausprägung der VRM-Fähigkeit konkret benötigt wird und sich die Auswahl einer Variante dann an dem Ergebnis dieser Feststellung orientieren.

3.3.5 Der Ansatz des Multiple Resolution Modeling (MRM)

Als ergänzender Abschluss soll hier die von [Reynolds et al. 97] vorgeschlagene Methode des **Multiple Resolution Modeling (MRM)**⁸⁷ vorgestellt werden. Das MRM stellt einen Ansatz zur Verbesserung des Cross Resolution Modeling (CRM) dar, besitzt aber auch deutliche Überschneidungen mit dem Verfahren des Variable Resolution Modeling (VRM). Herkömmlicherweise wird im Rahmen des CRM der Zustand eines simulierten Objektes zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Regel mit jeweils nur einer Auflösung abgebildet. Der Übergang zwischen verschiedenen Auflösungsstufen findet bei Bedarf durch Aggregation (HRE → LRE) bzw. Deaggregation (LRE → HRE) statt und kann mit Konsistenz- bzw. Zeitproblemen behaftet sein. Das MRM versucht dieses Problem mit Hilfe von Elementen mit multiplen Auflösungen (*Multiple Resolution Entity* = MRE) zu umgehen und somit die Konsistenz zwischen unterschiedlichen Auflösungsstufen zu wahren. Ein MRE soll dabei in die Lage versetzt werden, gleichzeitig auf mehreren Auflösungsstufen mit anderen Objekten, sowohl LREs als auch HREs, zu interagieren (vgl. Abbildung 3.17), ohne dass dabei eine Aggregation oder Deaggregation mit dem damit verbundenen Rechen- und Verwaltungsaufwand notwendig wird. Zu diesem Zweck sollen die vorgeschlagenen MREs Informationen über ihren Zustand auf allen relevanten Auflösungsstufen stets vorrätig halten bzw. in der Lage sein, diese bei Bedarf zeitgerecht zur Verfügung zu stellen. Als problematisch erweist sich dabei die Aufgabe, die Darstellung des Objektzustands auf allen Auflösungsstufen konsistent zu halten. Zu diesem Zweck muss der Einfluss jeder Interaktion eines MRE mit einem HRE oder LRE auf den Zustand des Objekts auf allen internen Auflösungsstufen abgebildet werden. Das kann wiederum nur durch Aggregations- bzw. Deaggregationsberechnungen geschehen, wobei diese jedoch auf die Berechnung einzelner Zustandsparametern bzw. die Auswirkung der Änderung von Zustandsparametern einer Auflösungsstufe auf die Parameter der anderen Stufen beschränkt sind. Eine vollständige Aggregation bzw. Deaggregation des Objektes ist bei der Verwendung von MREs nicht notwendig.

Bei der Bewertung des Multiple Resolution Modeling muss somit abgewogen werden, ob die Vereinfachung, welche durch die Vermeidung des Aufwands der herkömmlichen Aggregation und Deaggregation von Objekten erzielt wird, den neuen, durch die interne parallele Verwaltung mehrerer Auflösungsstufen und die Wahrung der Konsistenz zwischen den jeweiligen Zustandsabbildungen auf diesen Stufen entstehenden Mehraufwand rechtfertigt. Als vorteilhaft ist bei Verwendung des MRM jedoch sicherlich zu bewerten, dass die Probleme der Ketten-deaggregation sowie der Auflösungsoszillation durch dieses Verfahren zuverlässig vermieden werden und diese wesentlichen Belastungen für das Simulationssystem somit entfallen.

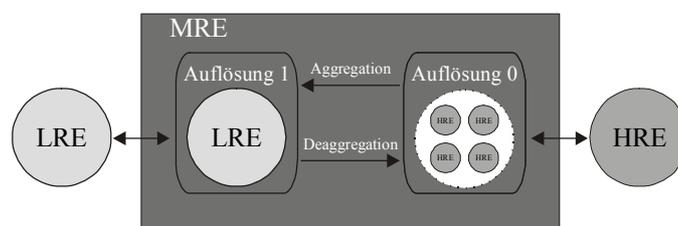


Abbildung 3.17: Darstellung eines MRE mit zwei Auflösungsstufen bei gleichzeitiger Interaktion mit je einem HRE und LRE

⁸⁷ [Davis, Bigelow 98], [Davis, Zeigler 97] und andere verwenden den Begriff des Multiple Resolution Modeling im Unterschied zu älteren Arbeiten als neue Bezeichnung für das bereits beschriebene Verfahren des Variable Resolution Modeling. Das in [Reynolds et al. 97] beschriebene Verfahren des MRM besitzt mit diesem zwar Überschneidungen, sollte aber nicht a priori mit ihm gleichgesetzt werden.

3.4 Zusammenfassung

Ausgehend von der Betrachtung der spezifischen Vor- und Nachteile sowohl aggregierter als auch hochauflösender Modelle für die unterschiedlichen Verwendungszwecke als Einsatzunterstützungssysteme, Ausbildungshilfsmittel oder Analysewerkzeuge wird schnell deutlich, dass die Existenz und Entwicklung von Modellen beider Gruppen nicht nur eine theoretische Begründung hat, sondern sich diese vielmehr in notwendiger Art und Weise ergänzen können, um dadurch ihre größt mögliche Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Das Kombinieren aggregierter und hochauflösender Modelle bzw. Simulationsergebnisse etwa mit Hilfe eines der beschriebenen Ansätze muss jedoch grundsätzlich unter Wahrung der Konsistenz zwischen den einzelnen Modellen und Auflösungsstufen geschehen. Geeignete Aggregations- und Deaggregationsmechanismen, welche unter Vermeidung von übermäßigem Entwicklungs- und Ressourcenaufwand die geforderte Konsistenz herstellen und wahren können, sind deshalb unabdingbar.

4 ZUR AGGREGIERTEN ABBILDUNG ELEMENTARER GEFECHTSPROZESSE

4.1 Allgemeines

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Ansätze zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen vorgestellt und diskutiert.

Als elementare Gefechtsprozesse sollen in diesem Rahmen die Prozesse *Bewegung*, *Zielaufklärung* und *aktive/passive Abnutzung* verstanden werden, da sie von grundlegender Bedeutung für das Gefechtsgeschehen sind und ihre Abbildung damit ausschlaggebend für die Güte des jeweiligen Modellierungsansatzes ist. Von zentralem Interesse ist dabei die Abbildung der eigentlichen Abnutzungsprozesse, wobei die in einigen Ansätzen vorhandenen Modelle für Aufklärungs- und Zielauswahlprozesse als integrale Bestandteile der jeweiligen Modellierung des Abnutzungsprozesses ebenfalls dargestellt werden.

Das gemeinsame Ziel der vorgestellten Modellierungsansätze ist es, Abnutzungsprozesse des modernen Gefechts verbundener Waffen aggregiert darzustellen, d.h. eine Methode zu bieten, die charakteristische Effekte und Eigenschaften dieses Gefechts zufriedenstellend abbildet, ohne dabei den Abbildungs- und Rechenaufwand sowie den Datenbedarf eines Einzelschuss-simulationsmodells zu erreichen. Als charakteristische Eigenschaften bzw. Einflussgrößen eines modernen Gefechts sollten dabei unter anderem

- die hohe *Dynamik* und *Mobilität* moderner Waffensysteme,
- die ausgeprägte *Heterogenität* des Waffensystemspektrums moderner Verbände,
- durch den Kampf der verbundenen Waffen auftretende *Synergieeffekte* in der Waffenwirkung,
- *C⁴I-Prozesse*⁸⁸ und
- der Einfluss von *Human Factors*⁸⁹ auf das Kampfgeschehen

in einer Form abgebildet werden, welche die Analyse der Auswirkungen dieser Faktoren auf das Gefechtsgeschehen ermöglicht. Voraussetzung dafür ist, dass der jeweilige Modellierungsansatz die Durchführung einer Vielzahl von Simulationsläufen mit systematisch veränderten Parametern innerhalb eines akzeptablen Zeitrahmens erlaubt, um einer anschließenden Analyse mit statistischen Methoden den Rückgriff auf ausreichendes Datenmaterial zu ermöglichen. Der Sensibilitätsgrad, mit dem der jeweilige Ansatz auf Änderungen des zugrunde liegenden hochauflösenden Szenars reagiert, d.h. der Umfang und die Komplexität der Änderungen, welche bei einer Variation des Szenars im aggregierten Modell notwendig werden, ist damit ein zentrales Maß für die Fähigkeit eines einzelnen Ansatzes zur systematischen Analyse.

⁸⁸ C⁴I=Command, Control, Communications, Computers and Intelligence

⁸⁹ Unter „*Human Factors*“ versteht man den Einfluss menschlicher Eigenschaften und Empfindungen wie etwa Mut, Ausdauer und Ausbildung aber auch Stress, Hunger und Angst auf das Gefecht sowie Aspekte menschlichen Verhaltens, welche in militärischen Entscheidungs- und Führungssituationen eine Rolle spielen.

Im Folgenden dargestellt und hinsichtlich der genannten Kriterien beurteilt werden:

1. das lineare und quadratische *Gesetz von Lanchester* sowie wichtige spätere Erweiterungen,
2. die Verwendung von *Markov-Prozessen* zur Abbildung des Gefechtsgeschehens, vertieft am Beispiel des Modells HORUS,
3. die Nutzung *zellulärer Automaten* in Gefechtssimulationssystemen am Beispiel der Modelle ZEGA, ZELGAT und ISAAC und
4. die Zerlegung komplexer Gefecht in *Netzwerke stochastischer Kleingefechte*.

4.2 Modellierung von Abnutzungsprozessen mit Lanchestermodellen

4.2.1 Die ursprünglichen Modelle von Lanchester

4.2.1.1 Das quadratische Gesetz von Lanchester

Der vermutlich am weitesten verbreitete Ansatz zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in Gefechtssimulationssystemen unterschiedlicher Auflösungsstufen (vgl. Tabelle 4.1) ist die Nutzung sogenannter Lanchestermodelle.

Modell	Auflösung der elementaren Gefechtsobjekte
PABST ⁹⁰	Trupp, Gruppe
COSIMAC-P-S	Zug
KOSMOS	Kompanie, Bataillon, Regiment

Tabelle 4.1: Modelle mit Lanchesteransatz

Die dabei eingesetzten Modelle gehen auf eine Arbeit des Briten F. W. Lanchester aus dem Jahr 1914 zurück.⁹¹ Lanchester beschreibt darin eine Möglichkeit, die Bedeutung des *Prinzips der Kräftekonzentration*⁹² in „modernen“ (1914) Konflikten zwischen zwei jeweils homogenen Gegnern mit Hilfe einfacher Differentialgleichungssysteme analytisch nachzuweisen.⁹³ Der Ausgangspunkt für seine Überlegungen ist nach [Taylor 83a] die folgende Hypothese:

In „ancient times“, warfare was essentially a sequence of one-on-one duels so that the casualty-exchange ratio during any period of battle did not depend on the combatants' force level. But under „modern conditions“, however, the firepower of weapons widely separated in firing location can be concentrated on surviving targets so that each side's casualty rate is proportional to the number of enemy firers and the casualty-exchange ratio consequently depends inversely on the force ratio.

Der Ansatz von Lanchester basiert also auf der Annahme, dass „moderne“ Streitkräfte Dank erhöhter Reichweiten ihrer Waffensysteme in der Lage sind, die Feuerwirkung eigener Systemen auch auf entfernte Ziele zu verteilen und somit die Anzahl der verursachten gegnerischen Verluste proportional zur Menge der feuernden Systeme ist. Diese neue Art der Gefechtsführung löst damit die klassische Duellsituation ab, in der die Soldaten beider Seiten sich mit Hilfe von Nahkampfwaffen⁹⁴ direkt konfrontierten und eine Bekämpfung entfernter Ziele aufgrund mangelnder Reichweiten praktisch nicht möglich war. Aus diesen Annahmen leitet Lanchester das folgende System beschreibender Differentialgleichungen für die moderne Kriegsführung zwischen zwei Parteien X und Y ab:

⁹⁰ Das stochastische Ereignisfolgesimulationsmodell PABST (*Panzer Abwehr Bewertungsinstrument*) der IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, Ottobrunn) dient zur Abbildung des Gefechts der verbundenen Waffen und zur Bewertung neuer Panzerabwehrsysteme (vgl. etwa [IABG 91]). PABST wurde im Rahmen einer Studie 1993 um ein Infanteriemodul ergänzt, welches auch den abgessenen Kampf der leichten Infanterie und Panzergrenadiere beschreibt und zur Abnutzungsrechnung ein Lanchestermodell einsetzt (vgl. etwa [Wollschläger 93]).

⁹¹ vgl. dazu [Lanchester 14]

⁹² Unter dem Prinzip der Kräftekonzentration versteht man die Annahme, dass es für eine militärische Partei sinnvoller ist, ihre Kräfte (Waffensysteme) geschlossen zur Wirkung zu bringen und sie nicht zu zersplittern.

⁹³ Eine ausführliche Beschreibung dieses Nachweises findet sich in [Taylor 83a], S. 53ff.

⁹⁴ Unter Nahkampfwaffe sind hierbei alle Waffensysteme zu verstehen, welche über eine geringe Reichweite verfügen (z.B. Schwert, Axt, etc.) und nur im direkten Kampf gegen einen Gegner eingesetzt werden können.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \begin{cases} -ay & , \text{ falls } x(t) > 0 \\ 0 & , \text{ falls } x(t) = 0 \end{cases} \\ \frac{dy}{dt} &= \begin{cases} -bx & , \text{ falls } y(t) > 0 \\ 0 & , \text{ falls } y(t) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4.1)$$

wobei

- $x(t)$ = Zahlenmäßige Stärke der Partei X zum Zeitpunkt t , mit $x(0) = x_0$ (z.B. gemessen in Soldaten, Panzern, Waffensystemen)
- $y(t)$ = Zahlenmäßige Stärke der Partei Y zum Zeitpunkt t , mit $y(0) = y_0$ (z.B. gemessen in Soldaten, Panzern, Waffensystemen)
- x_0 = Zahlenmäßige Stärke der Partei X zum Startzeitpunkt des Gefechts
- y_0 = Zahlenmäßige Stärke der Partei Y zum Startzeitpunkt des Gefechts
- a = Maßgröße für die Effektivität der Waffensysteme von Partei Y
- b = Maßgröße für die Effektivität der Waffensysteme von Partei X

Die beiden Effektivitätsmaßgrößen a und b werden dabei als Lanchesterkoeffizienten der Seite Y respektive der Seite X bezeichnet und beschreiben die Rate, mit der ein Schütze der Seite Y (bzw. X) Ziele der Seite X (bzw. Y) vernichtet. Aus (4.1) erhält man durch Integration die Zustandsgleichung

$$b(x_0^2 - x(t)^2) = a(y_0^2 - y(t)^2), \quad (4.2)$$

welche allgemein als das *Quadratische Gesetz von Lanchester* bezeichnet wird. Mit Hilfe von (4.1) und den Startbedingungen $x(0) = x_0$ und $y(0) = y_0$ lässt sich zusätzlich der Kräfteverlauf für beide Seiten über der Zeit t geschlossen beschreiben durch:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2} \left[\left(x_0 - \sqrt{\frac{a}{b}} y_0 \right) e^{\sqrt{ab}t} + \left(x_0 + \sqrt{\frac{a}{b}} y_0 \right) e^{-\sqrt{ab}t} \right] \\ y(t) &= \frac{1}{2} \left[\left(y_0 - \sqrt{\frac{b}{a}} x_0 \right) e^{\sqrt{ab}t} + \left(y_0 + \sqrt{\frac{b}{a}} x_0 \right) e^{-\sqrt{ab}t} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.2.1.2 Das lineare Gesetz von Lanchester

Im weiteren Verlauf seiner Arbeit beschreibt Lanchester zusätzlich eine Möglichkeit, die Wirkung von Flächenfeuer mathematisch abzubilden. Er geht dazu von einer Gefechtssituation aus, in der beide Parteien ihr Feuer nur auf die Fläche verteilen, in der sie den Gegner vermuten und nicht spezifische Einzelziele auffassen und bekämpfen. Lanchester entwickelt dazu das folgende beschreibende Differentialgleichungssystem:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \begin{cases} -a^*xy & , \text{ falls } x(t) > 0 \\ 0 & , \text{ falls } x(t) = 0 \end{cases} \\ \frac{dy}{dt} &= \begin{cases} -b^*xy & , \text{ falls } y(t) > 0 \\ 0 & , \text{ falls } y(t) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4.4)$$

wobei wiederum

- $x(t)$ = Zahlenmäßige Stärke der Partei X zum Zeitpunkt t , mit $x(0) = x_0$ (z.B. gemessen in Soldaten, Panzern, Waffensystemen)
- $y(t)$ = Zahlenmäßige Stärke der Partei Y zum Zeitpunkt t , mit $y(0) = y_0$ (z.B. gemessen in Soldaten, Panzern, Waffensystemen)
- x_0 = Zahlenmäßige Stärke der Partei X zum Startzeitpunkt des Gefechts
- y_0 = Zahlenmäßige Stärke der Partei Y zum Startzeitpunkt des Gefechts
- a^* = Maßgröße für die Effektivität der Waffensysteme von Partei Y
- b^* = Maßgröße für die Effektivität der Waffensysteme von Partei X

Auch in diesem Fall werden die Maßgrößen a^* und b^* als Lanchesterkoeffizienten der Parteien Y und X bezeichnet. Es ist allerdings wichtig festzustellen, dass diese Lanchesterkoeffizienten eine andere Bedeutung haben, als die Lanchesterkoeffizienten des Quadratischen Gesetzes.

Betrachtet man (4.4), so erhält man erneut durch Integration die Zustandsgleichung

$$b^*(x_0 - x(t)) = a^*(y_0 - y(t)), \quad (4.5)$$

welche in der Literatur als das *Lineare Gesetz von Lanchester* bezeichnet wird. Auch in diesem Fall ist es möglich, mit Hilfe von (4.4) und den Startbedingungen $x(0) = x_0$ und $y(0) = y_0$ den Kräfteverlauf für beide Seiten über der Zeit t geschlossen zu beschreiben.

Es gilt:

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{cases} \frac{b^*x_0 - a^*y_0}{b^*x_0 - a^*y_0 \exp[-(b^*x_0 - a^*y_0) \cdot t]} & , \text{ falls } b^*x_0 \neq a^*y_0 \\ \frac{x_0}{1 + b^*x_0t} & , \text{ falls } b^*x_0 = a^*y_0 \end{cases} \\ y(t) &= \begin{cases} \frac{a^*y_0 - b^*x_0}{a^*y_0 - b^*x_0 \exp[-(a^*y_0 - b^*x_0) \cdot t]} & , \text{ falls } a^*y_0 \neq b^*x_0 \\ \frac{y_0}{1 + a^*y_0t} & , \text{ falls } a^*y_0 = b^*x_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Zum genaueren Verständnis und zur folgenden kritischen Betrachtung des *Quadratischen und Linearen Gesetzes von Lanchester* werden hier die Annahmen für die Anwendung der beiden Modelle noch einmal zusammengefasst.

Voraussetzungen für die Anwendung des Quadratischen Gesetzes von Lanchester:⁹⁵

- (VQ 1) Jede der beiden am Gefecht beteiligten Parteien setzt sich aus homogen Waffensystemen zusammen. Das bedeutet, dass alle Waffensysteme einer Partei exakt die gleiche Effektivität und Verwundbarkeit besitzen. Waffensysteme unterschiedlicher Parteien können jedoch durchaus unterschiedliche Werte besitzen.
- (VQ 2) Jedes Waffensystem einer Partei kann jedes System der gegnerischen Partei bekämpfen bzw. selbst durch dieses bekämpft werden.
- (VQ 3) Die Auswirkung eines Schusses ist unabhängig von vorausgegangenen Schüssen.
- (VQ 4) Jedes Waffensystem besitzt vollständige Information über den Zustand und die Position aller gegnerischen Waffensysteme. Ein Waffensystem bekämpft aufgefasste Ziele mit gezieltem Feuer. Bereits ausgefallene Systeme werden nicht erneut bekämpft.
- (VQ 5) Jedes Waffensystem vernichtet feindliche Ziele mit einer konstanten Rate, welche nicht von der jeweiligen Anzahl gegnerischer Systeme abhängt.
- (VQ 6) Die Zielauffassungszeit für ein Waffensystem ist unabhängig von der Anzahl gegnerischer Waffensysteme.
- (VQ 7) Das Feuer aller Waffensysteme einer Partei wird gleichmäßig über alle verbliebenen Systeme des Feindes verteilt.

Voraussetzungen für die Anwendung des Linearen Gesetzes von Lanchester:⁹⁶

- (VL 1) Jede der beiden am Gefecht beteiligten Parteien setzt sich aus homogen Waffensystemen zusammen. Das bedeutet, dass alle Waffensysteme einer Partei exakt die gleiche Effektivität und Verwundbarkeit besitzen. Waffensysteme unterschiedlicher Parteien können jedoch durchaus unterschiedliche Werte besitzen.
- (VL 2) Jedes Waffensystem einer Partei kann jedes System der gegnerischen Partei bekämpfen bzw. selbst durch dieses bekämpft werden.
- (VL 3) Die Auswirkung eines Schusses ist unabhängig von vorausgegangenen Schüssen.
- (VL 4) Jedes Waffensystem besitzt nur Informationen darüber, in welchem Raum sich die feindlichen Systeme aufhalten und feuert deshalb ungezielt in dieses Gebiet, ohne die Wirkung seiner Schüsse beobachten zu können.
- (VL 5) Das Feuer der verbleibenden Waffensysteme einer Partei wird gleichmäßig über das Gebiet verteilt, in dem sich die gegnerischen Systeme aufhalten.
- (VL 6) Jedes Waffensystem einer Partei besitzt die gleich Letalfläche. Diese ist deutlich größer als die eigentliche Fläche des Systems.
- (VL 7) Die Anzahl an Treffern, welche benötigt wird um ein System zu vernichten, unterliegt einer geometrischen Wahrscheinlichkeitsverteilung.

⁹⁵ vgl. etwa [Taylor 83a], Seite 162

⁹⁶ vgl. etwa [Taylor 83a], Seite 163

4.2.1.3 Bewertung der ursprünglichen Modelle von Lanchester

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die ursprünglichen Modelle von Lanchester dazu geeignet sind, grundlegende Thesen der „modernen“ Kriegsführung, wie etwa das *Prinzip der Kräftekonzentration* oder die sogenannte *3:1-Regel*⁹⁷, mit mathematischen Ansätzen analytisch zu untersuchen und gegebenenfalls nachzuweisen. Für eine adäquate Nachbildung elementarer Gefechtsprozesse in hoch- und höchstauflösenden Gefechtssimulationssystemen erscheinen sie jedoch aus folgenden Gründen ungeeignet:

1. *Homogenität der Parteien*: Die ursprünglichen Modelle von Lanchester setzen einen homogenen Aufbau der am Gefecht beteiligten Parteien voraus (VQ1 bzw. VL1). Diese Voraussetzung ist im heutigen Gefecht der verbundenen Waffen jedoch nicht mehr gegeben. In modernen Gefechten agieren vielmehr verschiedene Waffensysteme⁹⁸ eng verbunden, welche sich in Effektivität und Verwundbarkeit erheblich unterscheiden können. Eine Gleichbewertung der verschiedenen Waffensysteme in Form eines einheitlichen Lanchesterkoeffizienten einer Partei kommt also nicht in Frage, da eine realistische Abbildung der Gefechtshandlungen die Abbildung genau dieser Unterschiede beinhalten muss.
2. *Konstante Lanchesterkoeffizienten*: Die Annahme konstanter – von Zeit und Entfernung unabhängiger – Lanchesterkoeffizienten ist im Gefecht der verbundenen Waffen ebenfalls nicht haltbar. Die Effektivität, d.h. die Treffwahrscheinlichkeit und Letalität, aber auch die Verwundbarkeit der eingesetzten Waffensysteme kann je nach Entfernung und Dauer des Gefechts stark variieren. Besonders sogenannte weiche Einflussfaktoren (Human Factors), wie etwa Ermüdung, Stress oder Angst, welche in neuen Gefechtssimulationsmodellen vermehrt betrachtet werden, können erhebliche Auswirkungen auf die Effektivität von Waffensystemen haben. Sie werden jedoch durch konstante Lanchesterkoeffizienten nicht erfasst.
3. *Sekundäre Wirkung von Waffensystemen*: Der ursprüngliche Lanchesteransatz betrachtete nur die zerstörende Wirkung von Waffensystemen. Für den Verlauf des Gefechts sind aber auch Sekundärwirkungen (z.B. Niederhaltewirkung eines Waffensystems)⁹⁹ von erheblicher Bedeutung und müssen deshalb in einer detaillierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse berücksichtigt werden.
4. *Deterministisches Gefecht*: Militärische Auseinandersetzungen sind gerade in den elementaren Abnutzungsprozessen hochgradig zufallsbehaftet. Der stochastische Charakter von Prozessen, wie etwa der Zielerfassung, Bekämpfung oder Ermittlung der Trefferwirkung, wird in den ursprünglichen Lanchestermodellen jedoch nicht berücksichtigt, da hier von einem determinierten Gefechtsverlauf mit beispielsweise konstanten Zielauffassungs- und Zielvernichtungsraten ausgegangen wird.
5. *Weitere Einflussgrößen*: Der Einfluss wichtiger zusätzlicher Größen, wie etwa des Geländes oder der verwendeten Taktik, auf den Verlauf des Gefechts wird nicht berücksichtigt.

⁹⁷ vgl. etwa [Davis 95]

⁹⁸ Als Beispiel sei hier auf einen modernen Panzergrenadierzug verwiesen, welcher unter anderem über Schützenpanzer, Panzerabwehrlenkflugkörper, Maschinengranatwaffen sowie Maschinen- und Sturmgewehre verfügt und damit augenscheinlich nicht als homogen angenommen werden kann.

⁹⁹ Gerade die Niederhaltewirkung spielt in modernen Gefechten eine zentrale Rolle. Eine wesentlich Aufgabe von Systemen mit hoher Kadenz (etwa Maschinengewehr oder –kanone) liegt nämlich darin, den Gegner niederzuhalten und ihn damit der Möglichkeit zu berauben, seine eigenen Waffensysteme einzusetzen. Solche Waffensysteme werden deshalb oft bewusst für Niederhaltefeuer und nicht für den gezielten Beschuss eingesetzt.

6. *Gefecht bis zur vollständigen Vernichtung*: Der Ansatz von Lanchester geht in der Regel davon aus, dass ein Gefecht bis zur vollständigen Vernichtung einer der beiden Parteien geführt wird. Dies ist in den meisten Gefechten jedoch nicht der Fall, da eine Partei, welche erhebliche Verluste erlitten hat, sich oftmals zurückzieht um ihre Kräfte aufzufrischen und dann später erneut den Kampf zu suchen.

Um diese genannten Kritikpunkte zu beseitigen oder sie zumindest abzumildern, wurden im Laufe der Zeit etliche Veränderungen und Erweiterungen an der ursprünglichen Arbeit von Lanchester vorgenommen. Einige dieser modifizierten Lanchesteransätze sollen nun im Folgenden vorgestellt werden.

4.2.2 Erweiterungen der ursprünglichen Modelle von Lanchester

4.2.2.1 Der Lanchesteransatz für heterogene Kräfte

Es wurde bereits festgestellt, dass ein wesentlicher Nachteil der ursprünglicher Modelle von Lanchester die Annahme der Homogenität der am Gefecht beteiligten Parteien ist. Kräfte, welche an einem modernen Gefecht der verbundenen Waffen teilnehmen, sind absichtlich aus heterogenen Waffensystemen zusammengesetzt, um die Vorteile des Zusammenwirkens dieser unterschiedlichen Systeme zu nutzen. Der Lanchesteransatz lässt sich jedoch entsprechend erweitern, um auch ein Gefecht heterogener Parteien abzubilden.¹⁰⁰ Es werden dazu die folgenden zusätzlichen Annahmen getroffen:

- (VH 1) Die Wirkungen unterschiedlicher Waffensystemtypen gegenüber einem bestimmten feindlichen Waffensystem sind rein additiv. Dies bedeutet vor allem, dass keine Synergieeffekte zwischen den Waffensystemtypen abgebildet werden.
- (VH 2) Die Verlustrate, welche durch einen gegnerischen Waffensystemtyp verursacht wird, ist proportional zur Anzahl der vorhanden gegnerischen Waffensysteme dieses Typs.

Auf der Basis dieser Annahmen wird nun das heterogene Lanchestermodell wie folgt definiert (vgl. Abbildung 4.1):

- m = Anzahl unterschiedlicher Waffensystemtypen auf Seite X
- n = Anzahl unterschiedlicher Waffensystemtypen auf Seite Y
- i = Index der Waffensystemtypen der Seite X ($1 \leq i \leq m$)
- j = Index der Waffensystemtypen der Seite Y ($1 \leq j \leq n$)
- x_i = Anzahl der Waffensysteme vom Typ i der Seite X
- y_j = Anzahl der Waffensysteme vom Typ j der Seite Y
- x_{ij} = Anzahl der Waffensysteme vom Typ i der Seite X, welche Waffensysteme vom Typ j der Seite Y bekämpfen
- y_{ji} = Anzahl der Waffensysteme vom Typ j der Seite Y, welche Waffensysteme vom Typ i der Seite X bekämpfen
- a_{ji} = Rate, mit welcher ein Waffensysteme vom Typ j der Seite Y gegnerische Waffensysteme vom Typ i der Seite X vernichten kann
- b_{ij} = Rate, mit welcher ein Waffensysteme vom Typ i der Seite X gegnerische Waffensysteme vom Typ j der Seite Y vernichten kann

Damit gilt offensichtlich:¹⁰¹

$$x_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad \text{und} \quad (4.7)$$

$$y_j = \sum_{i=1}^m y_{ji}$$

¹⁰⁰ vgl. dazu [Taylor 83b], Seite 482ff

¹⁰¹ Man geht dabei von der Annahme aus, dass sich stets alle verfügbaren Waffensysteme einer Seite an dem Gefecht beteiligen.

Um die Verteilung des Feuers einer Seite auf die verschiedenen Waffensystemtypen des Gegners abzubilden, definiert man die Allokationsfaktoren ϕ_{ij} und ψ_{ji} als:

$$\phi_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{x_i} & , \text{ falls } x_i > 0 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\psi_{ji} = \begin{cases} \frac{y_{ji}}{y_j} & , \text{ falls } y_j > 0 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases}$$

Mit Hilfe dieser Faktoren erhält man nun das folgende System beschreibender Differentialgleichungen für das Gefecht zwischen zwei heterogenen Parteien X und Y :

$$\frac{dx_i}{dt} = - \sum_{j=1}^n \psi_{ji} a_{ji} y_j$$

$$\frac{dy_j}{dt} = - \sum_{i=1}^m \phi_{ij} b_{ij} x_i \quad (4.9)$$

mit $x_i(0) = x_i^0$ und $y_j(0) = y_j^0$ als Anfangsstärken der Waffensystemtypen von X und Y .

[Taylor 83b]¹⁰² stellt fest, dass dieses Differentialgleichungssystem mit analytischen Mitteln praktisch nicht lösbar ist. [Schaub 91a] empfiehlt deshalb für die Praxis den Einsatz numerischer Integrationsverfahren.¹⁰³

Ein weiteres Problem bei der Abbildung des Gefechts heterogener Kräfte mit Hilfe von (4.9) liegt in der Bestimmung der Allokationsfaktoren ϕ_{ij} und ψ_{ji} . Diese Faktoren repräsentieren die Feuerallokation der jeweiligen Parteien über die verfügbaren Zielwaffensysteme und beschreiben damit eine menschliche Führungsentscheidung. Eine solche Priorisierung stellt jedoch einen hochgradig lageabhängigen¹⁰⁴ und teilweise unbewussten Vorgang dar und sollte deshalb durch die Schaffung eigener Priorisierungsmodelle separat abgebildet werden.

¹⁰² vgl. [Taylor 83b], S. 489

¹⁰³ z.B. Euler-Chauchy ([Bronstein et al. 95], S. 765) oder Runge-Kutta ([Bronstein et al. 95], S. 766).

¹⁰⁴ Man betrachte etwa ein Minenräumfahrzeug, dem der Gegner grundsätzlich eine sehr niedrige Bekämpfungspriorität einräumen wird. Wird dieses Fahrzeug nun zur Räumung einer Sperre eingesetzt, dann werden die die Sperre überwachenden Kräfte diesem Fahrzeug eine sehr hohe Bekämpfungspriorität zuweisen.

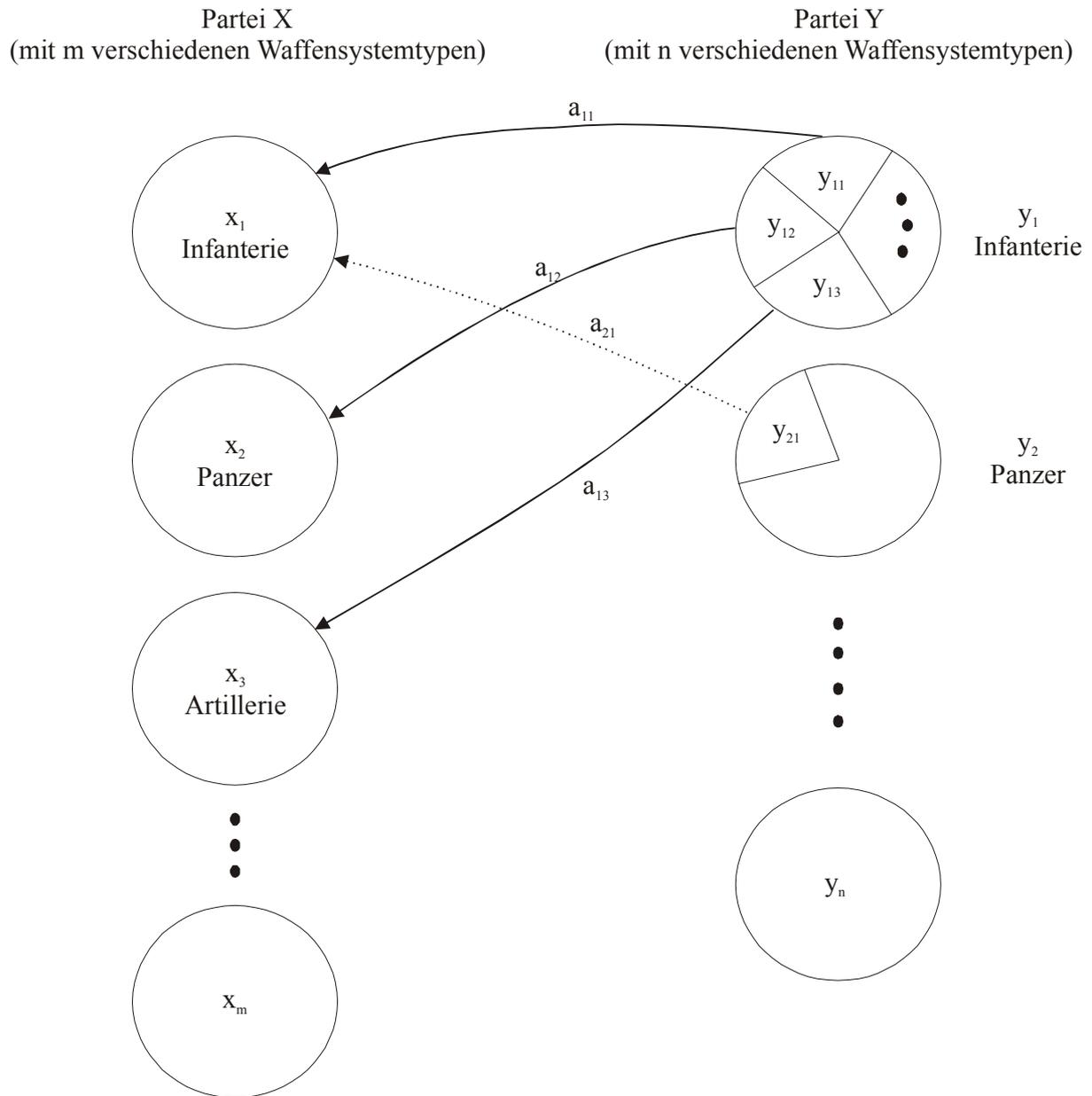


Abbildung 4.1: Modellierung eines Gefechts zwischen Parteien X und Y, mit jeweils m bzw. n unterschiedlichen Waffensystemtypen (nach [Taylor 83b])

4.2.2.2 Der Lanchesteransatz mit entfernungsabhängigen Koeffizienten

Um den Nachteil zeit- und entfernungsunabhängiger Lanchesterkoeffizienten des ursprünglichen Modells zu umgehen, schlägt Bonder¹⁰⁵ ein Modell vor, in welchem die Koeffizienten von dem Abstand zwischen Schützen- und Zielwaffensystem abhängig sind. Er macht dazu folgende grundsätzliche Annahmen:

- (VB 1) Ein Angreifer nähert sich mit einer konstanten Geschwindigkeit einer stationären Verteidigungsposition.
- (VB 2) Die Effektivität der eingesetzten Waffensysteme ist von der Entfernung zwischen Schützen und Ziel abhängig.
- (VB 3) Jede der beiden am Gefecht beteiligten Parteien setzt sich aus homogenen Waffensystemen zusammen. Das bedeutet, dass alle Waffensysteme einer Partei exakt die gleiche Effektivität und Verwundbarkeit besitzen. Waffensysteme unterschiedlicher Parteien können jedoch durchaus unterschiedliche Werte besitzen.
- (VB 4) Jedes Waffensystem besitzt vollständige Information über den Zustand und die Position aller gegnerischen Waffensysteme. Ein Waffensystem bekämpft aufgefasste Ziele mit gezieltem Feuer. Bereits ausgefallene Systeme werden nicht erneut bekämpft.
- (VB 5) Die Zielauffassungszeit für ein Waffensystem ist unabhängig von der Anzahl gegnerischer Waffensysteme.

Unter Annahme dieser Voraussetzungen schlägt Bonder das folgende System beschreibender Differentialgleichung zur Abbildung dieser Gefechtssituation (vgl. Abbildung 4.2) vor:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\alpha(r)y \quad , \text{ mit } x(0) = x_0 \\ \frac{dy}{dt} &= -\beta(r)x \quad , \text{ mit } y(0) = y_0 \end{aligned} \tag{4.10}$$

wobei

- $x(t)$ = Anzahl der Waffensysteme von Partei X zum Zeitpunkt t
- $y(t)$ = Anzahl der Waffensysteme von Partei Y zum Zeitpunkt t
- x_0 = Anzahl der Waffensysteme von Partei X zum Zeitpunkt $t=0$
- y_0 = Anzahl der Waffensysteme von Partei Y zum Zeitpunkt $t=0$
- $r(t)$ = Entfernung zwischen den feindlichen Parteien zum Zeitpunkt t
- $\alpha(t)$ = entfernungsabhängiger Lanchesterkoeffizient der Partei Y
- $\beta(t)$ = entfernungsabhängiger Lanchesterkoeffizient der Partei X

Für die Ermittlung der Entfernung r werden die Positionen der Parteien X und Y vereinfacht als zwei Punkte¹⁰⁶ angenommen. Die räumliche Verteilung der Einzelwaffensysteme beider

¹⁰⁵ vgl. [Taylor 83b], Seite 211

¹⁰⁶ etwa die Positionen der Massenschwerpunkte der beiden Parteien

Seiten wird dabei also nicht betrachtet. Man erhält damit die zeitabhängige Entfernung $r(t)$ als:

$$r(t) = r_0 - vt \tag{4.11}$$

wobei

- r_0 = Entfernung zwischen X und Y zum Zeitpunkt $t=0$
- v = Konstante Angriffsgeschwindigkeit von Y

[Taylor 83b] zeigt an Hand mehrerer Beispiele, dass der Kräfteverlauf der Parteien X und Y und schlussendlich das Ergebnis des Gefechts in dem Modell von Bonder sehr stark von den gewählten Funktionen $\alpha(r)$ und $\beta(r)$ für die entfernungsabhängigen Lanchesterkoeffizienten abhängt. Selbst kleine Anfangsunterschiede dieser Koeffizienten können aufgrund von Akkumulationseffekten zu wachsenden Differenzen im Kräfteverlauf und damit dem Gefechts-ergebnis führen.

Es lässt sich deshalb feststellen, dass auch das Modell von Bonder nicht in der Lage ist, die mit konstanten Lanchesterkoeffizienten verbundene Kritik zu beseitigen. Die sehr restriktiven Annahmen einer konstanten Angriffsgeschwindigkeit, einer stationären Verteidigungsposition und die Reduzierung der Position der beiden Parteien auf zwei Punkte lassen sich in einem modernen und von Angreifer und Verteidiger beweglich geführten Gefecht der verbundenen Waffen kaum halten. Eine Erweiterung dieses Modells auf heterogene Kräfte würde sicherlich eine Verbesserung bedeuten, es bleibt jedoch fraglich, ob ein solches Modell lösbar und damit beherrschbar wäre.

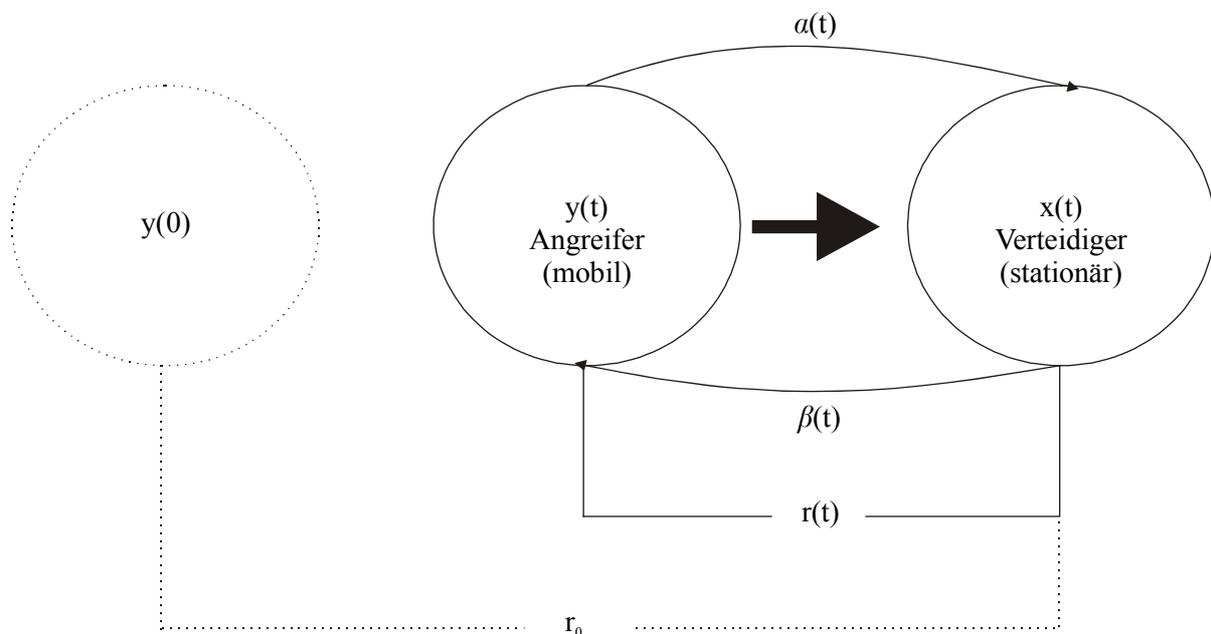


Abbildung 4.2: Modell von Bonder (nach [Taylor 83b])

4.2.2.3 Andere Erweiterungen des ursprünglichen Lanchestermodells

Im Lauf der Jahre wurde etliche weitere Modifikationen des ursprünglichen Lanchestermodells vorgeschlagen, welche ausführlich vorzustellen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Der Vollständigkeit halber sollen aber drei weitere wichtige Modifikationen zumindest kurz beschrieben werden.

1. Gefechtsunabhängige Verluste: Gefechtsverbände erleiden während eines Krieges Verluste nicht nur durch Feindeinwirkung. Unfälle, Materialermüdung, Desertationen oder Ausfälle durch Krankheit vermindern die Zahl der einsatzfähigen Waffensysteme aller am Konflikt beteiligten Parteien fortlaufend. Peterson [Peterson 67]¹⁰⁷ schlug 1953 deshalb ein Modell vor, welches diese Verluste abbildet. Er ging dabei von der Annahme aus, dass die Abnutzungsrate einer Seite proportional zu ihrer eigenen Stärke ist. Aufgrund der Form seiner Zustandsgleichung¹⁰⁸ bezeichnet man das Modell von Peterson allgemein auch als *Logarithmisches Lanchestermodell*.
2. Gezieltes Feuer mit Unterstützungsfeuer: Für die Abbildung des Gefechts der verbundenen Waffen wurde von Weiss [Weiss 59] ein Modell vorgeschlagen, welches basierend auf dem *Quadratischen Lanchestergesetz* die Wirkung unterstützender Artillerie berücksichtigt.¹⁰⁹ Die Artilleriewaffensysteme sind in diesem Modell in der Lage zu wirken, unterliegen dabei selbst aber keinen Abnutzungsprozessen (vgl. Abbildung 4.3).

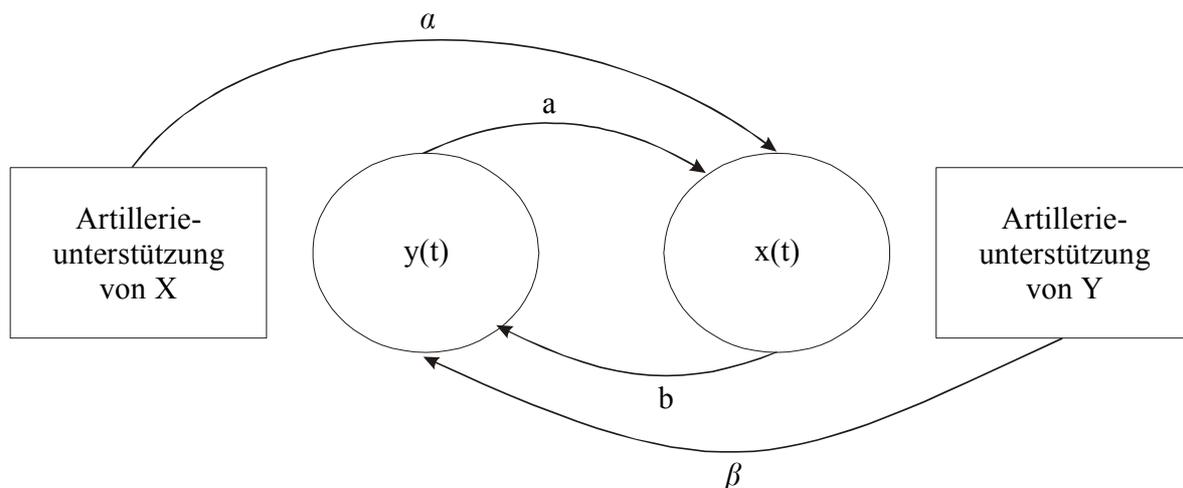


Abbildung 4.3: Quadratisches Lanchestermodell mit Unterstützungsfeuer (nach Taylor 83b))

3. Stochastische Lanchestermodelle: Es wurde bereits festgestellt, dass der Verlauf und damit auch das Ergebnis eines Gefechts in hohem Maße zufallsbehaftet ist. Das ursprüngliche Lanchestermodell mit seinem deterministischen Verlauf trägt dieser Tatsache jedoch nicht Rechnung. Es wurden deshalb etliche Ansätze untersucht, um stochastische Größen in Lanchestermodellen zu integrieren. Zu diesem Zweck bieten sich u.a. folgende Möglichkeiten an:¹¹⁰

¹⁰⁷ vgl. auch [Taylor 83a], S. 171

¹⁰⁸ vgl. [Schaub 91a], S. 19

¹⁰⁹ vgl. [Taylor 83a], S. 172

¹¹⁰ vgl. [Taylor 83a], S. 390

- der Gebrauch zufälliger bzw. zufällig variierter Lanchesterkoeffizienten,
- die zufällige Variation der Anfangsstärken x_0 und y_0 der beiden Parteien,
- die zufällige Variation der *Breakpointstärken* x_{BP} und y_{BP} oder
- die Modellierung des Auftretens von Ausfällen durch einen Zufallsprozess.

Es lässt sich leicht einsehen, dass die ersten drei Möglichkeiten nicht wirklich geeignet sind, den deterministischen Charakter des Gefechtsverlaufs im Lanchestermodell zu beseitigen, da sie vor allem den Zustand der Parteien X und Y nach Ende des Gefechts beeinflussen. Aus diesem Grund konzentriert sich die Forschung besonders auf die Modellierung des Auftretens von Ausfällen mit Hilfe von geeigneten Zufallsprozessen, da dies die stochastische Natur des realen Gefechtsverlaufs widerspiegelt. [Taylor 83a] beschreibt die Möglichkeit, ein solches Modell unter Einsatz eines Markov-Prozesses und die Wahl geeigneter Wahrscheinlichkeitsfunktionen zu realisieren.¹¹¹ [Schaub 91a] stellt jedoch fest, dass es damit zwar prinzipiell möglich ist, Fragen nach den Gewinnwahrscheinlichkeit der Parteien oder der Verteilung der überlebenden Waffensysteme zu beantworten, die dazu benötigten Gleichungssysteme besonders für große Anfangsstärken aber schnell sehr komplex werden, so dass es nicht mehr möglich ist, das Verhalten des Prozesses im Detail zu verfolgen. Die beabsichtigte Analyse des Gefechtsverlaufs wird somit wiederum unmöglich.

¹¹¹ vgl. [Taylor 83a], S. 388ff oder [Schaub 91a], S. 26ff

4.2.3 Ansätze zur Ermittlung von Lanchesterkoeffizienten

Der Einsatz eines Lanchestermodells für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse setzt voraus, dass es möglich ist, Zahlenwerte für die dazu notwendigen Parameter anzugeben. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei die Bestimmung geeigneter Lanchesterkoeffizienten, da diese den Gefechtsverlauf und damit das Ergebnis einer Simulation grundlegend beeinflussen. Nach [Taylor 83b] wurden bisher hauptsächlich zwei Ansätze für die Bestimmung von Lanchesterkoeffizienten verwendet.

- (1) *Bestimmung der Lanchesterkoeffizienten mit Hilfe eines analytischen Modells für den Abnutzungsprozess eines Zieltyps*: Das Ziel dieser Methode ist nach [Bonder 67] die Bestimmung eines analytischen Ausdrucks für jeden benötigten Lanchesterkoeffizienten. Dies geschieht auf der Basis eines einfachen Abnutzungsmodells, welches den Kampf eines einzelnen Schützen gegen ein passives Ziel beschreibt.
- (2) *Schätzung der Lanchesterkoeffizienten auf der Basis der Simulationsergebnisse eines hochauflösenden Gefechtssimulationssystems oder historischer Gefechtsdaten*: Bei diesem Ansatz werden die benötigten Lanchesterkoeffizienten mit Hilfe statistischer Methoden aus Daten geschätzt, welche vorher durch Auswertung der Simulationsläufe eines hochauflösenden Gefechtssimulationssystems oder existierender Aufzeichnungen realer Gefechte gewonnen wurden. Ein solches Vorgehen wurde erstmals in [Clark 69] beschrieben.

Auf eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei beiden Ansätzen wird in diesem Rahmen verzichtet.¹¹²

¹¹² Eine solche Beschreibung findet sich etwa in [Taylor83b], S. 1ff oder [Schaub 91a], S. 34 ff.

4.2.4 Abschließende Bewertung

Wie bereits erwähnt, entwickelte Lanchester sein Modell der modernen Kriegsführung mit dem Ziel, die Bedeutung des *Prinzips der Kräftekonzentration* nachzuweisen. Für solche grundlegenden analytischen Aufgaben hat sich das Lanchestermodell mit seinen beschriebenen Erweiterungen oftmals als gut geeignet erwiesen. Für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse innerhalb eines hochauflösenden Gefechtssimulationssystems wird der Lanchesteransatz heutzutage jedoch zumeist als ungeeignet bewertet.¹¹³

Schaub [Schaub 91a] stellt auf der Grundlage umfangreicher Experimente mit dem hochauflösenden Gefechtssimulationssystem BASIS¹¹⁴ fest, dass sowohl konstante als auch variable – d.h. etwa zeit- bzw. entfernungsabhängige – Lanchesterkoeffizienten in hohem Maße von lokalen Gefechtsparametern abhängen. Als solche lokalen Einflussgrößen identifiziert er unter anderem

- die *Anzahl* der vorhandenen Ziele,
- die *räumliche Verteilung* der Ziele,
- den vorliegenden *Zielmix*, d.h. die Zusammensetzung der Ziele aus verschiedenen Waffensystemtypen sowie
- das Ausmaß der Fähigkeit der Verursacher, ihr *Feuer koordiniert* abzugeben, d.h. eine Klumpenbildung bei der zeitlichen Verteilung der Schüsse zu erreichen.

[Schaub 91a] weist zusätzlich darauf hin, dass Lanchesterkoeffizienten außerdem auch von globalen Parametern, etwa den technischen Eigenschaften der Waffensystemtypen, der Gefechtsart¹¹⁵ oder auch dem Geländetyp abhängen. Er bemerkt weiterhin, dass selbst eine Klassifizierung möglicher Szenarien nach all diesen Parametern nicht ausreicht, um daraus auf die zu verwendenden Lanchesterkoeffizienten zu schließen, da sich im Rahmen seiner Experimente gezeigt hat, dass selbst eine Simulation gleicher Gefechte in verschiedenen Geländen desselben Geländetyps zu einer potentiell unterschiedlichen Schätzung der Lanchesterkoeffizienten führen kann. Aufgrund dieser Erkenntnisse erscheint es unmöglich, für die Vielzahl möglicher Szenarien, welche in einem hochauflösenden Gefechtssimulationssystem betrachtet werden sollen, geeignete Lanchesterkoeffizienten zu ermitteln.

Daneben muss allgemein festgestellt werden, dass herkömmliche Lanchestermodelle nicht flexibel genug sind, den modernen Kampf der verbundenen Waffen realistisch darzustellen. Eine adäquate Abbildung der dabei ablaufenden Prozesse setzt voraus, dass eine Vielzahl von Faktoren Berücksichtigung finden. Solche Faktoren wären unter anderem:

- die *hohe Dynamik* moderner Gefechte und der daraus resultierende ständige Wechsel von Kampfentfernungen, Duellpaarungen und eingesetzten Waffensystemen,

¹¹³ vgl. etwa [Ancker 95] oder [Leffingwell 87]

¹¹⁴ BASIS ist ein hochauflösendes Einzelschussimulationssystem, welches ab 1982 am Institut für Angewandte Systemforschung und Operations Research der Universität der Bundeswehr in München entwickelt wurde. Eine detaillierte Modellbeschreibung findet sich in [Hofmann et al. 86] und [Schaub 91b].

¹¹⁵ etwa Angriff, Verteidigung oder Verzögerung

- die aus der Forderung nach dem Kampf der verbundenen Waffen resultierende hohe *Heterogenität moderner Streitkräfte*,
- die mit dem gleichzeitigen Einsatz unterschiedlichster Waffensystemtypen verbundene *Synergieeffekte* in der Waffenwirkung oder auch
- sogenannte *Human Factors und C⁴I-Prozesse*, deren großer Bedeutung für den Gefechtsverlauf – auch von militärischer Seite – immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Die beschriebenen Modifikationen des ursprünglichen Modells von Lanchester und unzählige weitere Arbeiten bemühen sich zwar einzelne oder mehrere dieser Faktoren in neuen Lanchestermodellen zu integrieren, die dabei entstehenden Ansätze weisen aber in der Regel ein sehr hohes Maß an Komplexität auf. Eine Lösung dieser Modelle ist deshalb oft gar nicht oder nur noch bedingt mit Mitteln der numerischen Mathematik möglich. Ein detailliertes Nachvollziehen der einzelnen Gefechtsprozesse scheitert meist ganz.

All diese Gründe führen zu der abschließenden Annahme, dass Lanchestermodelle für den Einsatz in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen nur schlecht geeignet sind, so dass bessere Alternativen gesucht werden müssen.

4.3 Modellierung von Abnutzungsprozessen mit Markov-Ketten

4.3.1 Grundsätzliches zu Markov-Ketten und ihrer Verwendung in Gefechtssimulationssystemen

Ein den Modellen von Lanchester verwandter Ansatz ist die Nutzung sogenannter Markov-Ketten für die Beschreibung von Gefechtshandlungen.

Die Theorie der Markov-Prozesse und ihrer Sonderform der Markov-Ketten geht auf eine Arbeit des russischen Mathematikers *A.A. Markov* aus dem Jahr 1906 zurück. Markov untersuchte in [Markov 06] und folgenden Arbeiten eine spezielle Klasse *stochastischer Prozesse*, welche über die – nach ihm benannte – *Markov-Eigenschaft* verfügen. Markov-Ketten werden zur Abbildung stochastischer Systeme, d.h. von Systemen deren Zustandsänderungen zufallsbehaftet sind, verwendet. Sie erlauben eine Untersuchung der abgebildeten Systeme mit einfachen analytischen Mitteln und ermöglichen dadurch Prognosen über deren zukünftiges Verhalten.¹¹⁶

4.3.1.1 Definition eines stochastischen Prozesses¹¹⁷

Unter einem *stochastischen Prozess* γ versteht man eine Familie von Zufallsgrößen X_t , wobei $t \in P$ einen – zumeist aber nicht notwendigerweise als Zeit interpretierten – Indexparameter, P den Parameterraum, d.h. die Menge der möglichen Ausprägungen von t , und Z den Zustandsraum, d.h. die Menge der möglichen Ausprägungen von X_t bezeichnet. Es gilt also:

$$\gamma = \{X_t | t \in P\} \quad (4.12)$$

mit

$$X_t \in Z$$

P = Parameterraum des stochastischen Prozesses

Z = Zustandsraum des stochastischen Prozesses

4.3.1.2 Definition eines Markov-Prozesses¹¹⁸

Als **Markov-Prozess** bezeichnet man einen stochastischen Prozess, bei dem die Prognose über die folgende Realisierung der Zufallsgröße nur von dem momentanen Zustand, d.h. der letzten Realisierung abhängt und nicht von den davor liegenden Realisierungen beeinflusst wird, d.h. die „Zukunft“ ist bei Kenntnis der „Gegenwart“ von der „Vergangenheit“ unabhängig. Umgangssprachlich bezeichnet man diese **Markov-Eigenschaft** auch häufig als Gedächtnislosigkeit.

Ein stochastischer Prozess γ heißt somit Markov-Prozess, wenn für beliebige $x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, y \in \mathbb{R}$, $n = 1, 2, \dots, k$ und beliebige $t_n \in P$ mit $t_0 < t_1 < \dots < t_k$ gilt:

$$\begin{aligned} p(X_{t_k} \leq y | X_{t_{k-1}} = x_{k-1}, X_{t_{k-2}} = x_{k-2}, \dots, X_{t_0} = x_0) = \\ p(X_{t_k} \leq y | X_{t_{k-1}} = x_{k-1}) \end{aligned} \quad (4.13)$$

¹¹⁶ Markov – Ketten erlauben z.B. die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit welcher sich ein untersuchtes System nach einer gewissen Zeit in einem speziellen Zustand befindet.

¹¹⁷ vgl. etwa [Hillier, Liebermann 88], Kapitel 15

¹¹⁸ vgl. etwa [Dynkin 61], Kapitel 2

4.3.1.3 Allgemeines zu Markov-Ketten

Als **Markov-Kette** bezeichnet man einen Markov-Prozess mit abzählbar (un)endlichem Zustandsraum Z und abzählbar (un)endlichem Parameterraum P . Es gilt also:

Ein stochastischer Prozess γ mit Zustandsraum $Z \subseteq N_0$ heißt Markov-Kette, genau dann, wenn für beliebige $i, i_1, \dots, i_{k-1}, j, k \in N_0$:

$$\begin{aligned} p(X_k = j \mid X_{k-1} = i, X_{k-2} = i_1, \dots, X_0 = i_{k-1}) = \\ p(X_k = j \mid X_{k-1} = i) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$p_i(n) = p(X_n = i)$ bezeichnet man dabei als Zustandswahrscheinlichkeit des Zustands i .

Die Wahrscheinlichkeit $p_{ij}^k := p(X_k = j \mid X_{k-1} = i)$ bezeichnet man als **1-Schritt Übergangswahrscheinlichkeit** oder auch nur als Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand i in den Zustand j . Gilt $p_{ij}^k = p_{ij} \forall i, j, k$, d.h. ist p_{ij}^k unabhängig von k , so spricht man ferner von einer **homogenen Markov-Kette**.

Repräsentiert wird eine Markov-Kette¹¹⁹ durch den zugehörigen Zustandsübergangsgraphen (vgl. Abbildung 4.4) oder die Übergangsmatrizen $M(k)$ (im homogenen Fall die Übergangsmatrix M) (vgl. Tabelle 4.2) als tabellarische Form des Graphen.

		Zustand						
		1	2	...	j	...	n-1	N
Zustand	1	p_{11}^k	p_{12}^k	...	p_{1j}^k	...	$p_{1(n-1)}^k$	p_{1n}^k
	2	p_{21}^k	p_{22}^k	...	p_{2j}^k	...	$p_{2(n-1)}^k$	p_{2n}^k
	:	:	:	:	:	:	:	:
	i	p_{i1}^k	p_{i2}^k	...	p_{ij}^k	...	$p_{i(n-1)}^k$	p_{in}^k
	:	:	:	:	:	:	:	:
	n-1	$p_{(n-1)1}^k$	$p_{(n-1)2}^k$...	$p_{(n-1)j}^k$...	$p_{(n-1)(n-1)}^k$	$p_{(n-1)n}^k$
	N	p_{n1}^k	p_{n2}^k	...	p_{nj}^k	...	$p_{n(n-1)}^k$	p_{nn}^k

Tabelle 4.2: Beispielhafte $n \times n$ Übergangsmatrix $M(k)$

¹¹⁹ Eine weitere Möglichkeit zur Abbildung einer Markov-Kette ist die Angabe des Systems beschreibender Differentialgleichungen. In dieser Darstellungsform wird die Verwandtschaft zu dem Modell von Lanchester besonders deutlich.

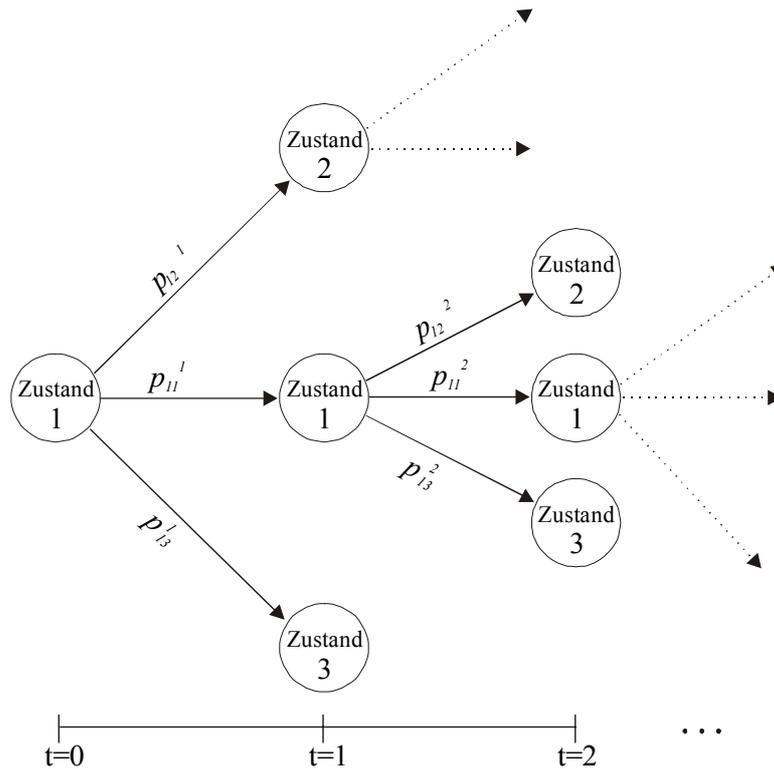


Abbildung 4.4: Darstellung eines Zustandsübergangsgraphen (Kreise repräsentieren mögliche Zustände des Systems, Pfeile mögliche Zustandsübergänge und Zahlen an den Pfeilen zugehörige Übergangswahrscheinlichkeiten.)

Für alle Zustände $j \in Z$ einer Markov-Kette und alle Parameter $k \in P$ – wobei k in der Regel als Beobachtungszeitpunkt des System S interpretiert wird – gilt der Satz von der totalen Wahrscheinlichkeit, d.h. die Beziehung:

$$p_j(k) = \sum_{i \in Z} p_i(k-1)p_{ij}^k \tag{4.15}$$

Damit wird deutlich, dass ein System S , repräsentiert durch eine Markov-Kette, damit durch die Übergangsmatrizen $M(k)$ und die Ausgangsverteilung π_0 vollständig bestimmt ist. In Vektor- bzw. Matrizenschreibweise bedeutet dies:

$$\pi_k = \pi_{k-1} \bullet M(k) \tag{4.16}$$

wobei

- π_k = Zustandsvektor des Systems S , mit $\pi_k = (p_1(k), p_2(k), \dots, p_i(k), \dots)$
- π_0 = Ausgangsverteilung des Systems S , mit $\pi_0 = (p_1(0), p_2(0), \dots, p_i(0), \dots)$

Startend mit der Ausgangsverteilung π_0 kann man mit Hilfe von (4.19) und den Übergangsmatrizen $M(1), M(2), \dots, M(n)$ damit sukzessive für jedes $k \in P$ die Wahrscheinlichkeiten bestimmen, mit denen sich das System zu diesem Zeitpunkt in einem bestimmten Zustand befindet. Eine Prognose über das zukünftige Verhalten des Systems S ist damit – bei Vorliegen der Übergangsmatrizen – mit einfachen mathematischen Mitteln möglich.

4.3.1.4 Verwendung von Markov-Ketten in Gefechtssimulationssystemen

Die Verwendung von Markov-Ketten in Gefechtssimulationssystemen geht von der Idee aus, dass es sich bei einem Gefecht um einen stochastischen Prozess handelt, der die jeweiligen Zustände der beteiligten Elemente (Waffensysteme) verändert. Um diesen Ansatz näher zu erläutern, soll das folgende einfache Beispiel¹²⁰ betrachtet werden:

Zwei feindliche Parteien (Blau/Rot) stehen sich in einem Gefecht gegenüber. Beide Parteien verfügen über jeweils zwei Kampfpfpanzer identischen Typs. Partei Blau eröffnet das Gefecht mit einer Salve auf Rot. Rot antwortet daraufhin mit einer Salve seiner verbliebenen Waffensysteme gegen Blau. Das Gefecht wird in dieser Art und Weise so lange geführt, bis eine der beiden Parteien vernichtet ist. Es wird weiterhin angenommen, dass ein Kampfpfpanzer der Partei Blau einen Kampfpfpanzer der Partei Rot mit der Wahrscheinlichkeit p_B trifft und vernichtet. Ein Kampfpfpanzer der Partei Rot trifft und vernichtet einen gegnerischen Panzer mit der Wahrscheinlichkeit p_R .

Betrachtet man dieses Gefecht als Veränderung des Systems bestehend aus Partei Blau und Rot, wobei jedes Waffensystem beider Parteien nur die Zustände *intakt* und *ausgefallen* annehmen kann, so lassen sich acht mögliche Gesamtzustände des Systems identifizieren (vgl. Tabelle 4.3).

Zustand	Bedeutung
(2,2)	2 KpPz von Blau intakt, 2 KpPz von Rot intakt
(2,0)	2 KpPz von Blau intakt, 0 KpPz von Rot intakt
(0,2)	0 KpPz von Blau intakt, 2 KpPz von Rot intakt
(2,1)	2 KpPz von Blau intakt, 1 KpPz von Rot intakt
(1,2)	1 KpPz von Blau intakt, 2 KpPz von Rot intakt
(1,1)	1 KpPz von Blau intakt, 1 KpPz von Rot intakt
(1,0)	1 KpPz von Blau intakt, 0 KpPz von Rot intakt
(0,1)	0 KpPz von Blau intakt, 1 KpPz von Rot intakt

Tabelle 4.3: Mögliche Systemzustände des beschriebenen Beispielgefechts

Mit Hilfe von p_B lassen sich nun leicht die Übergangswahrscheinlichkeiten für die möglichen Zustände nach einer Salve der Partei Blau wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
 p[(2,2) \rightarrow (2,2)] &= (1 - p_B)^2 \\
 p[(2,2) \rightarrow (2,0)] &= p_B^2 \\
 p[(2,2) \rightarrow (2,1)] &= 2 \cdot (1 - p_B) p_B
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

und in einer Übergangsmatrix M_B zusammenfassen:

¹²⁰ vgl. etwa [Tschujew 72]

		Zustand j nach einer Salve von Blau								
		(2,2)	(2,1)	(1,2)	(2,0)	(0,2)	(1,1)	(1,0)	(0,1)	(0,0)
Zustand i vor Salve von Blau	(2,2)	$(1-p_B)^2$	$2(1-p_B)p_B$	0	p_B^2	0	0	0	0	0
	(2,1)	0	$(1-p_B)^2$	0	$2(1-p_B)p_B + p_B^2$	0	0	0	0	0
	(1,2)	0	0	$(1-p_B)$	0	0	p_B	0	0	0
	(2,0)	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	(0,2)	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	(1,1)	0	0	0	0	0	$(1-p_B)$	p_B	0	0
	(1,0)	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	(0,1)	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	(0,0)	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabelle 4.4: Zustandsübergangsmatrix M_B : Wahrscheinlichkeiten für den Übergang von einem Zustand i in den Zustand j durch das Abfeuern einer Salve von Blau

Analog lassen sich danach die Wahrscheinlichkeiten für den Übergang in einen Zustand j durch Abfeuern einer Salve der Partei Rot berechnen und in einer Übergangsmatrix M_R tabellieren.

Bei dem damit beschriebenen stochastischen Prozess handelt es sich um eine Markov-Kette, welche sich zum Zeitpunkt t mit der Wahrscheinlichkeit $p_i(t)$ im Zustand i ($i \in Z, Z := \{(2,2), (2,1), (1,2), (2,0), (0,2), (1,1), (1,0), (0,1)\}$) befindet. Mit Hilfe der Übergangsmatrizen M_B und M_R und der Ausgangsverteilung π_0 mit

$$\pi_0 = (p_{(2,2)}(0), p_{(2,1)}(0), \dots) := (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \quad (4.18)$$

errechnen sich nun die Wahrscheinlichkeiten für jeden Zustand nach Abgabe einer vorgegebenen Anzahl von m Salvengruppen (d.h. m Salven jeder Partei) nach:

$$\pi_m = \pi_0 (M_B \bullet M_R \bullet M_B \bullet M_R \bullet \dots \bullet M_B \bullet M_R) = \pi_0 (M_B \bullet M_R)^m \quad (4.19)$$

wobei

$$\pi_m = (p_{(2,2)}(m), p_{(2,1)}(m), \dots) \quad (4.20)$$

Daraus lassen sich die Siegwahrscheinlichkeiten $p_{\text{Blau}}^{\text{Sieg}}$ für Blau bzw. $p_{\text{Rot}}^{\text{Sieg}}$ für Rot (vgl. Abbildung 4.5) durch Addition der jeweiligen Siegzustände¹²¹ ermitteln, durch:

$$\begin{aligned} p_{\text{Blau}}^{\text{Sieg}} &= p_{(2,0)}(m) + p_{(1,0)}(m) && \text{und} \\ p_{\text{Rot}}^{\text{Sieg}} &= p_{(0,2)}(m) + p_{(0,1)}(m) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Man hat damit eine analytische Lösung für die Ermittlung der Siegwahrscheinlichkeiten des beschriebenen Gefechts in Abhängigkeit der Anzahl abgegebener Salvengruppen gefunden.

¹²¹ Siegzustände für *Blau* sind die Zustände (2,0) und (1,0) für *Rot* (0,2) und (0,1).

Soll dagegen der Verlauf des Gefechts mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation abgebildet werden, so können mit Hilfe von (4.22), $m=1$ und (4.21) die Zustandswahrscheinlichkeiten nach Abgabe einer Salvengruppe ermittelt werden. Durch Ziehen einer (0,1)-gleichverteilten Zufallszahl und Vergleich dieser Zahl mit den errechneten Zustandswahrscheinlichkeiten kann dann der Zustand i simuliert werden, in welchem sich das System nach Abgabe dieser Salvengruppe befindet. Handelt es sich bei dem Zustand i noch nicht um einen Siegzustand für Blau oder Rot, so berechnet sich eine neue Ausgangsverteilung π_0' durch:

$$\pi_0' = (p_{x_1}(0), p_{x_2}(0), \dots, p_{x_k}(0)) \quad (4.22)$$

wobei

$$p_{x_j} = \begin{cases} 0 & , \text{ falls } x_j \neq i \\ 1 & , \text{ falls } x_j = i \end{cases} \quad (4.23)$$

Mit π_0' , (4.22) und $m=1$ lassen sich nun die Zustandswahrscheinlichkeiten nach Abgabe einer zweiten Salvengruppe erneut ermittelt und diese Salvengruppe durch Ziehen einer weiteren (0,1)-gleichverteilten Zufallszahl simulieren. Das beschriebene Verfahren kann solange wiederholt werden, bis das System einen Siegzustand für Blau oder Rot erreicht und damit der einmalige Ablauf eines Gefechts der beschriebenen Art simuliert worden ist.

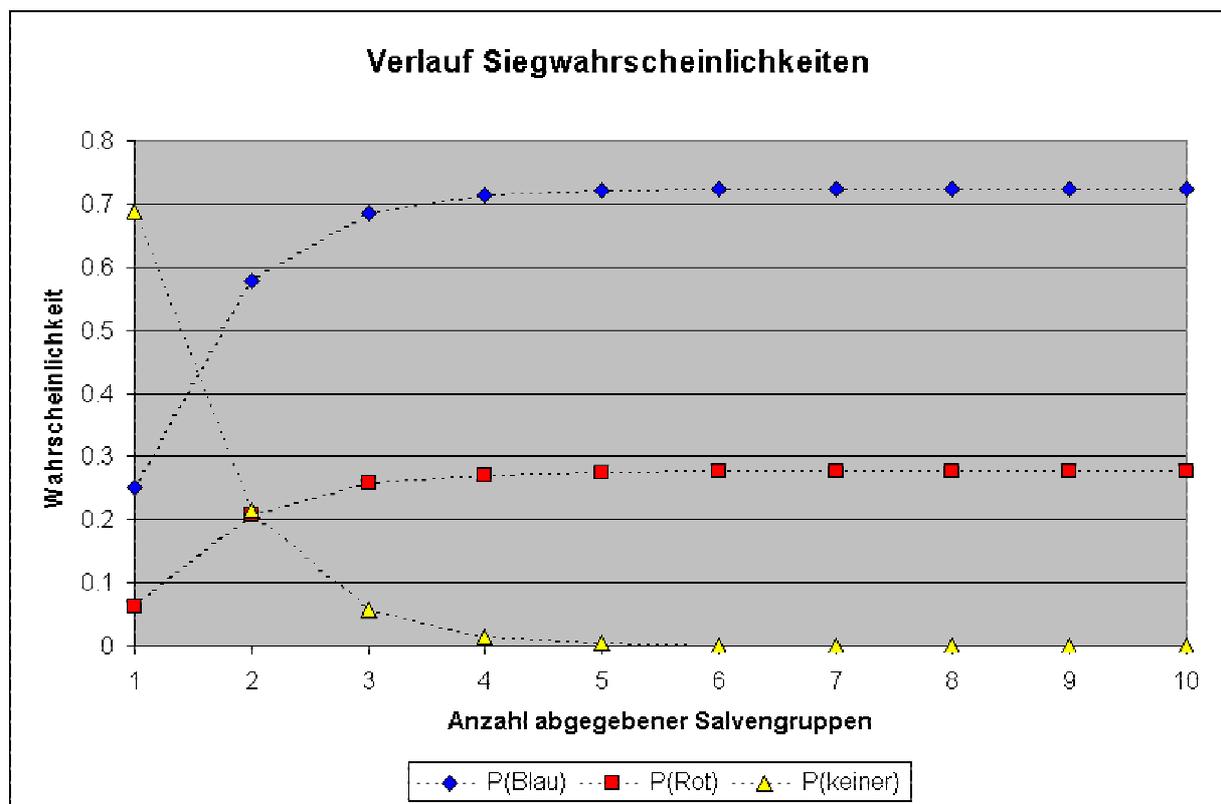


Abbildung 4.5: Beispielhafter Verlauf der Siegwahrscheinlichkeiten $P(\text{Blau})$, $P(\text{Rot})$ und der Wahrscheinlichkeit $P(\text{keiner})$, dass das Gefecht noch nicht beendet ist ($p_B = p_R = 0.5$)

4.3.2 Das Gefechtssimulationssystem HORUS

4.3.2.1 Allgemeines

Das hochauflösende Gefechtssimulationsmodell HORUS¹²² wurde seit Anfang der neunziger Jahre im Auftrag des BMVg durch die IABG entwickelt.¹²³ Das Modell bildet den Kampf der verbundenen Waffen im Rahmen einer Brigade oder Division bis auf Einzelfahrzeugebene ab und wurde ursprünglich zur Analyse von Einheits- und Verbandsstrukturen sowie der Ausrüstung und Wirksamkeit der Verbände des deutschen Heeres auf diesen Führungsebenen eingesetzt. HORUS wird durch die IABG seitdem fortlaufend erweitert und dient inzwischen hauptsächlich zur Unterstützung von Brigaderahmenübungen. Eine Weiterentwicklung des Modells HORUS als Werkzeug zur Einsatzunterstützung ist ebenfalls angedacht worden.

4.3.2.2 Das Abnutzungsmodell in HORUS

Da sowohl der Ansatz der Einzelschusssimulation als auch die Modelle von Lanchester als ungeeignet für die in HORUS betrachtete Auflösungsebene bewertet wurden, findet für die Abbildung der Abnutzungsprozesse ein Modell auf Basis von Markov-Ketten Verwendung. Betrachtet werden dabei nur Gefechte zwischen Teil-/Einheiten jeweils homogener Waffensysteme. Feuergefechte heterogener Einheiten werden auf diesen Fall zurückgeführt, indem sie in individuelle Feuergefechte homogener Teileinheiten zerlegt werden. Grundsätzlich wird dabei der Feuerkampf mit direktem Feuer für die Modellierung in die folgenden Phasen unterteilt:

1. *Aufklärungsphase*: In dieser Phase wird ermittelt, welche feindlichen Elemente (homogene Teil-/Einheiten) durch ein eigenes kampfbereites Element aufklärt werden. Zu diesem Zweck wird jedem aufklärenden Element B_i ein sogenannter Sensitivitätsbereich S_i zugewiesen. Dabei handelt es sich um eine Rechteckfläche im Gelände, in deren Mitte sich das Element B_i befindet. Die Ausdehnung von S_i ist ein benutzerdefiniertes Eingabedatum, welches aber grundsätzlich so gewählt wird, dass die maximale Reichweite der Waffensysteme von B_i den Sensitivitätsbereich nicht überschreitet (vgl. Abbildung 4.6). Für alle feindlichen Element R_j wird dann ermittelt, ob sie sich innerhalb von S_i befinden. Ist dies nicht der Fall, so wird ein solches Element durch B_i nicht aufgeklärt. Befindet sich ein Element R_j dagegen innerhalb von S_i , so wird ermittelt, ob B_i das Element R_j aufgeklärt hat. Dies erfolgt anhand
 - des von B_i verwendeten *Sensortyps* und dessen spezifischer *Leistungsdaten* (etwa der maximalen Aufklärungsreichweite, der Wellenlänge auf welcher das Sensorsystem arbeitet, dem maximalen Öffnungswinkel der Sensorkeule¹²⁴, usw.),
 - der *Entfernung* zwischen B_i und R_j ,
 - der *Art*, d.h. Höhe und Bewuchs, *des Geländes*, welches auf der Sichtlinie zwischen B_i und R_j liegt sowie

¹²² HORUS = **H**eeresmodell für **O**perations **R**esearch und zur Ausbildung von **S**täben (Ursprünglich: **H**eeresmodell für **O**perations **R**esearch zur **U**ntersuchung von **S**trategiefaktoren)

¹²³ Eine ausführliche Beschreibung des Modells HORUS ist in [Könke et al. 2000] enthalten.

¹²⁴ Als Sensorkeule bezeichnet man den Bereich ausgehend von der Position des Sensorsystems, der mit Hilfe dieses Systems eingesehen bzw. aufgeklärt werden kann.

- des *Tarngrades*, welchen das Element R_j durch den spezifischen Geländetyp und zusätzliche Tarnmaßnahmen erreicht hat.

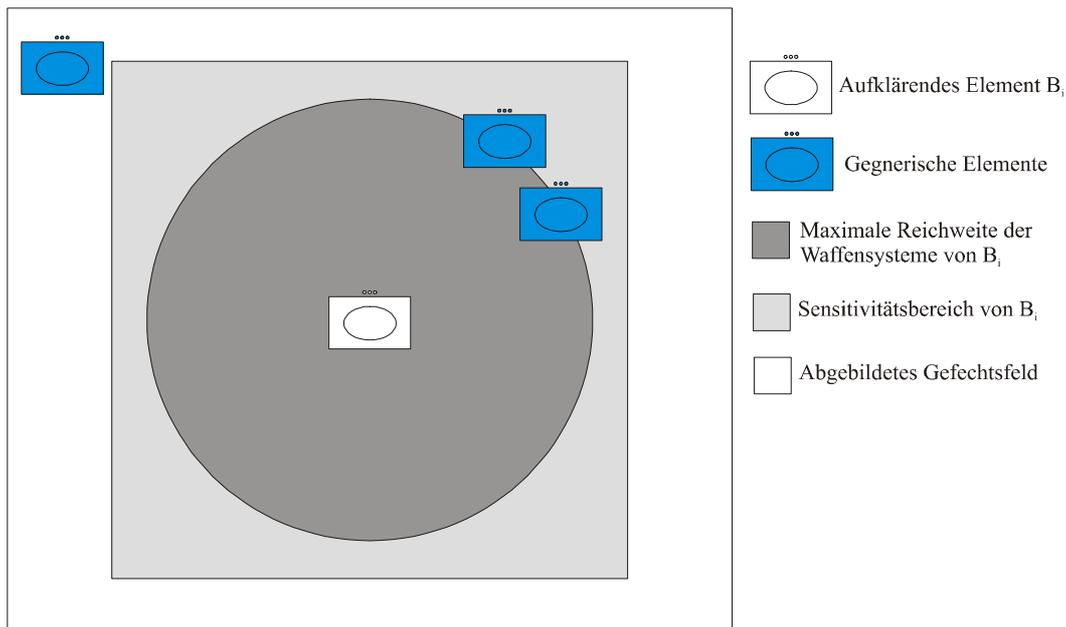


Abbildung 4.6: Sensitivitätsbereich eines aufklärenden Elements in HORUS

HORUS unterscheidet – analog zu der militärischen Gliederung des Aufklärungsprozesses – vier mögliche Ergebnisse dieses Berechnungsvorgangs:

- *Nicht entdecken*: B_i hat das Element R_j nicht entdeckt, dies kann dadurch zustande kommen, dass keine Sichtverbindung zwischen den beiden Elementen existiert oder das eingesetzte Sensorsystem nicht leistungsfähig genug ist.
- *Entdecken*: B_i hat das Element R_j entdeckt, ist aber nicht in der Lage, dieses zu identifizieren oder zumindest grob zu klassifizieren.
- *Erkennen*: B_i hat das Element R_j entdeckt und grob klassifizieren können.¹²⁵
- *Identifizieren*: B_i hat das Element R_j entdeckt und den genauen Typ identifizieren können.¹²⁶

Entdeckte, erkannte oder *identifizierte* Elemente R_j gelten als aufgeklärt und werden dann in der nächsten Phase hinsichtlich ihrer Bekämpfungswürdigkeit bewertet.

2. *Zielauswahlphase*: Aus den aufgeklärten feindlichen Elementen wird ein Ziel R_j ausgewählt. Dies geschieht anhand der Bedrohung, die R_j für das eigene Element darstellt und der Wahrscheinlichkeit, mit der dieses feindliche Element erfolgreich bekämpft werden kann. Als Ziel wird das aufgeklärte feindliche Element R_j ausgewählt, für welches der Nutzen $u(R_j)$ der Bekämpfung maximal ist, dabei gilt:

¹²⁵ Das aufklärende Element erkennt zum Beispiel, dass es sich bei dem entdeckten Element um ein Rad- oder Kettenfahrzeug handelt.

¹²⁶ Das aufklärende Element erkennt zum Beispiel, ob es sich bei dem entdeckten Element um einen Kampfpanzer T-72 oder Leopard 2A5 handelt.

$$u(R_j) = p_B \cdot p_R \quad (4.24)$$

mit

$$u(R_j) = \text{Nutzen, welcher der Bekämpfung des Ziels } R_j \text{ zugeordnet wird} \\ (0 \leq u \leq 1)$$

$$p_B = \text{Wahrscheinlichkeit der Zerstörung des Elements } R_j \text{ durch das eigene} \\ \text{Element}$$

$$p_R = \text{Wahrscheinlichkeit der Zerstörung des eigenen Elements durch das} \\ \text{feindliche Element } R_j$$

Eine Feuerkoordination innerhalb einer Partei, d.h. eine priorisierte Zielverteilung zwischen deren einzelnen Elementen – zum Beispiel mit Hilfe einer multidimensionalen Nutzwertanalyse¹²⁷ - findet in HORUS, soweit bekannt, nicht statt.

3. *Bekämpfungsphase*: Die eigentliche Abbildung der Bekämpfungsphase, d.h. die Berechnung der Wirkung des Feuerkampfes zwischen feindlichen Elementen, erfolgt dann mit Hilfe der Theorie der Markov-Ketten. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Gefechtsdynamik¹²⁸ der Einzelsysteme eines Elements abzubilden, ohne explizite Einzelduelle zu modellieren. Für ein Einzelsystem werden zu diesem Zweck die Zustände

- *Wirken*: das Waffensystem ist kampfbereit, hat einen Duellgegner entdeckt und bekämpft diesen,
- *Ausfall*: das Waffensystem ist ausgefallen,
- *Bewegen*: das Waffensystem führt im Anschluss an eine Schussabgabe einen kleinen Stellungswechsel¹²⁹ durch und
- *Sammeln*: das Waffensystem befindet sich nicht in einem der anderen drei Zustände

unterschieden und entsprechende Zustandsübergangsmatrizen – abhängig vom Zustand des Gegners, der jeweiligen Gefechtskonstellation und den eigenen Leistungsdaten – vorgegeben. Für die Abbildung des Gefechts zwischen zwei Elementen wird jedoch nicht die Veränderung des individuellen Zustands jedes Waffensystems bestimmt, sondern nur die Gesamtverteilung aller Waffensysteme des Elements auf die möglichen vier Zustände betrachtet. Aufgrund der geforderten Homogenität der betrachteten Elemente kann man bei den einzelnen Waffensystemen eines Elements von identischen Übergangsmatrizen und Zustandsräumen ausgehen. Ziel der Abnutzungsrechnung mit Hilfe der verwendeten Markov-Kette ist damit also nicht die Berechnung einer Folge von Zuständen für die individuellen Waffensysteme, sondern vielmehr die Berechnung einer Folge von Zustandsverteilungen (vgl. Abbildung 4.7) für die kämpfenden Elemente jeweils in Abhängigkeit

¹²⁷ Eine detaillierte Beschreibung einer Zielverteilung auf Zug- und Kompanieebene mit Hilfe einer multidimensionalen Nutzwertanalyse findet sich z.B. in [Beckert 98].

¹²⁸ Unter Gefechtsdynamik ist der stete Wechsel des Zustands eines Waffensystems während eines Feuergefechts zu verstehen.

¹²⁹ Als „kleinen Stellungswechsel“ bezeichnet man im militärischen Sprachgebrauch die Positionswechsel, welche eine Waffensystem im direkten Anschluss an eine oder mehrere Schussabgaben durchführt, um damit seine eigene Stellung gegenüber dem Gegner zu verschleiern und diesem die Aufklärung anhand der Abschusssignaturen des verwendeten Waffensystems zu erschweren.

von den Zustandsverteilungen der gegnerischen Elemente, mit denen diese im Feuerkampf stehen.

Grundlegende Voraussetzung für die Verwendung dieses Abnutzungsmodells ist die Bestimmung der

- *Startzustandsverteilungen* und
- *Übergangsmatrizen*

aller am Gefecht beteiligten Elemente. Die Ermittlung der *Übergangsmatrizen* geschieht analog zu der beschriebenen Vorgehensweise zur Bestimmung von Lanchesterkoeffizienten¹³⁰ durch die statistische Auswertung von Feldversuchen, historischen Gefechten oder den Ergebnissen höher auflösender Einzelschusssimulationsmodelle.¹³¹ Die dabei festgestellten Verweildauern eines Waffensystems in den einzelnen Zuständen und die ermittelten relativen Häufigkeiten für einen Zustandswechsel werden dann mit Hilfe analytischer Methoden¹³² in die gesuchten Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten umgerechnet.

Die Bestimmung der *Startzustandsverteilungen*, d.h. die Verteilung der Waffensysteme eines Elementes auf die möglichen Zustände *Wirken*, *Sammeln*, *Bewegen* und *Ausgefallen*, geschieht in HORUS ausgehend von der folgenden Annahme:

Der prozentuale Anteil der Waffensysteme eines Elements im Zustand Wirken entspricht dem prozentualen Anteil der Sichtbereiche im zulässigen¹³³ Dislozierungsraum¹³⁴ des Elements.¹³⁵

Dabei sind unter Sichtbereich solche Geländebereiche zu verstehen, von denen Teile des zulässigen Dislozierungsraumes des gegnerischen Elements eingesehen werden können.¹³⁶ Die Dislozierungsräume des eigenen und des gegnerischen Elements werden zu diesem Zweck in die, in der Geländeauflösung von HORUS üblichen 100m x 100m Quadrate eingeteilt, so dass für die Bestimmung der Sichtbereiche jeweils nur diese Quadrate und nicht einzelne Punkte im Gelände betrachtet werden müssen. Auf Basis dieser Annahme wird dann in den folgenden Schritten der Anteil der Waffensysteme im Zustand *Wirken* bestimmt:

- a) Die Anzahl a_B zulässiger Rasterzellen im Dislozierungsraum D_B des eigenen Elementes und die Anzahl a_R zulässiger Rasterzellen im Dislozierungsraum D_R des gegnerischen Elementes werden bestimmt.

¹³⁰ vgl. Kapitel 4.2.3, S. 64

¹³¹ vgl. [Knöll 91], S. 30f

¹³² zum Beispiel mit Hilfe der sogenannten Regressionsanalyse (vgl. [Bronstein et al. 95], S. 645)

¹³³ Als zulässig für die Dislozierung eines Elements gelten solche Rasterzellen des Dislozierungsraumes, welche aufgrund ihrer natürlichen Beschaffenheit in der Lage sind, ein Waffensystem aufzunehmen und nicht mit Hindernissen (Wasser, Sumpf, etc.) besetzt sind.

¹³⁴ Die Größe des jeweiligen Dislozierungsraumes richtet in HORUS sich nach der Größe des betrachteten Elementes. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein Zug über einen Dislozierungsraum von 100m x 100m, eine Kompanie von 400m x 400m und ein Bataillon von ca. 1600m x 1600m verfügt.

¹³⁵ Diese Annahme geht offensichtlich davon aus, dass jedes Waffensystem eines Verursachers je nach Schwierigkeit des Geländes nur einen gewissen Anteil der Waffensysteme der gegnerischen Partei bekämpfen kann, da es zu den restlichen keine Sichtverbindung besitzt.

¹³⁶ In diesem Zusammenhang werden die individuellen Leistungsdaten (Optikhöhe, Reichweite, etc.) der Sensorelemente der Waffensysteme des Elements berücksichtigt.

- b) Für jede zulässig Rasterzelle des Dislozierungsraumes D_B wird anhand der Geländebeschaffenheit und der Leistungsdaten der eingesetzten Sensorsysteme überprüft, ob Sichtverbindung zu mindestens einer zulässigen Rasterzellen aus D_R besteht. Ist dies der Fall, so wird diese Zelle zu der gesuchten Anzahl ar_B der Rasterzellen des Sichtbereichs addiert.
- c) Das Verhältnis ar_B zu a_B entspricht dann gemäß obiger Annahme dem Anteil der Waffensysteme des Elements im Zustand *Wirken*. Durch Subtraktion dieses Anteils von der Gesamtzahl nicht ausgefallener Waffensysteme des Elements erhält man weiterhin den Anteil der Waffensysteme im Zustand *Sammeln* und damit die gesuchte *Startzustandsverteilung*.

Auf Basis der so bestimmten Startzustandsverteilung und Übergangsmatrizen ist es nun möglich, mit einfachen Matrizenoperationen¹³⁷ die gesuchte Folge von Zustandsverteilungen für die an dem betrachteten Gefecht beteiligten Elemente zu berechnen und damit die Bekämpfungsphase bis zur Vernichtung einer Partei oder dem vorzeitigen Abbruch durch ein Element zu simulieren.

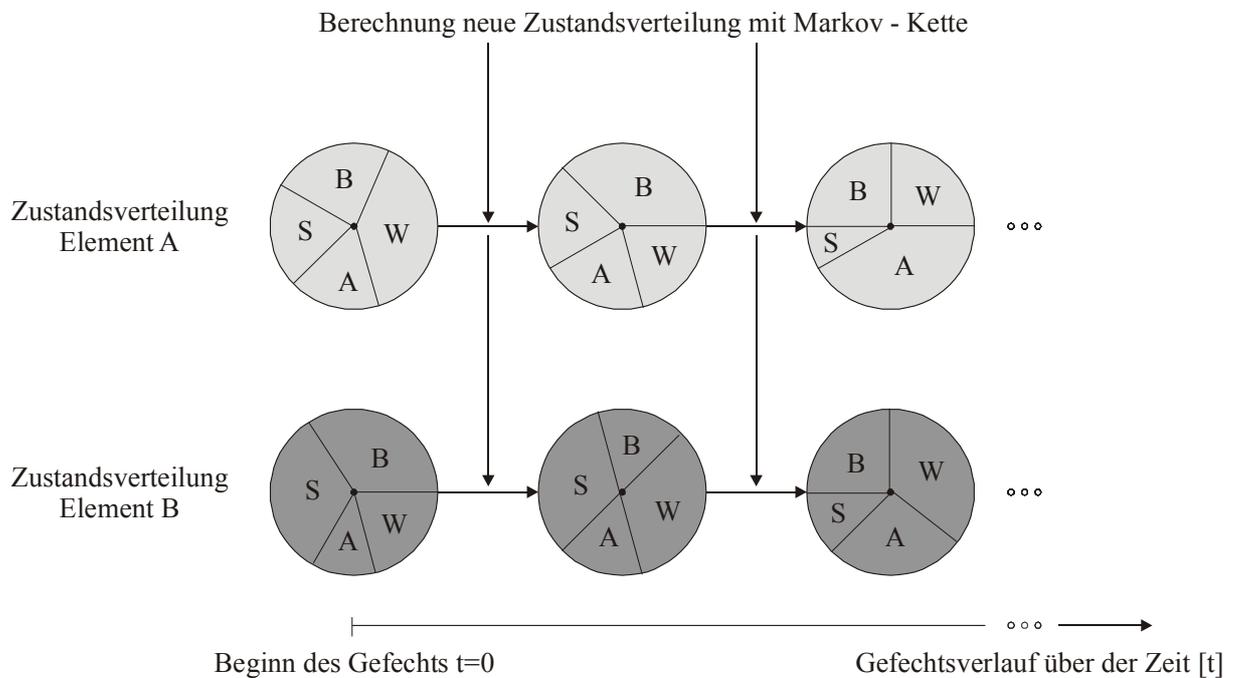


Abbildung 4.7: Bekämpfungsphase eines Gefechts zwischen den Elemente A und B in HORUS (Kreise stellen die jeweiligen Zustandsverteilungen der Elemente während des Gefechts dar, mit A = *Ausgefallen*, W = *Wirken*, B = *Bewegen* und S = *Sammeln*)

¹³⁷ vgl. Kapitel 4.3.1.4, S. 70ff

4.3.3 Abschließende Bewertung

Die Verwendung von Markov-Ketten in Gefechtssimulationssystemen scheint gut geeignet, einfache Gefechtshandlungen mit mathematischen Methoden analytisch zu untersuchen.¹³⁸

Voraussetzung für solche Untersuchungen ist jedoch, dass die spezifischen Ausgangsverteilungen und Zustandsübergangsmatrizen des jeweiligen Gefechts bekannt sind. Am Beispiel des Modells HORUS wurde aufgezeigt, dass diese Parameter unter Annahme gewisser einschränkender Voraussetzungen – wie etwa der Homogenität der betrachteten Elemente und der relativ kleinen Zahl möglicher Zustände eines Waffensystems – bestimmt werden können. Da die Bestimmung der Zustandsübergangsmatrizen auf analoge Weise zu der beschriebenen Bestimmung der Lanchesterkoeffizienten geschieht, liegt jedoch der Schluss nahe, dass hierbei die gleichen von [Schaub 91a] geschilderten Probleme¹³⁹ auftreten und die ermittelten Zustandsübergangsmatrizen sich als hochgradig abhängig von den lokalen und globalen Gefechtsparametern des jeweils betrachteten Szenars erweisen.

Die zugrunde liegende Theorie der Markov-Prozesse hat außerdem zur Folge, dass alle Einflussgrößen, welche bei der Betrachtung eines modernen Gefechts der verbundenen Waffen eine Rolle spielen, d.h. also auch *Human Factors* oder *C⁴I-Prozesse*, in Form der Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten kondensiert werden müssen. Dies bedeutet, dass eine systematische Analyse des Einflusses einer dieser Größen auf das Gefechtsgeschehen bei jeder Parameteränderung die Neubestimmung sämtlicher Zustandsübergangsmatrizen notwendig machen würde. Umfangreiche Testreihen mit häufig variierenden Parametern sind dadurch nicht oder zumindest nur mit einem sehr hohen Zeitaufwand durchführbar.

Zusammenfassend kann damit festgestellt werden, dass die Verwendung von Markov-Ketten zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen nur eingeschränkt geeignet erscheint, da die vorhandenen rechentechnischen Vorteile dieser Methode in diesem Anwendungsfeld durch die Probleme bei der Bestimmung der benötigten aktuellen Parameter, vor allem der Zustandsübergangsmatrizen, relativiert werden.

¹³⁸ vgl. Beispiel aus Kapitel 4.3.1.4

¹³⁹ vgl. Kapitel 4.2.4, S 65

4.4 Modellierung von Abnutzungsprozessen mit zellulären Automaten

4.4.1 Allgemeines

Ein weiterer Ansatz zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse ist die Verwendung von Abnutzungsmodellen auf der Basis zellulärer Automaten. Entsprechende Modelle wurden erstmals von [Schaub 91a] und [Cobb et al. 93] vorgeschlagen, wobei jedoch festgestellt werden muss, dass in diesen beiden Fällen eine unterschiedliche Motivation zur Nutzung zellulärer Automaten geführt hat. [Schaub 91a] stellt im Rahmen seiner Arbeit fest, dass ein Lanchestermodell zur aggregierten Abbildung der Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen ungeeignet ist, da dabei von zu vielen relevanten Einflussgrößen abstrahiert werden muss. Dies kann wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen – und damit Inkonsistenzen – zwischen aggregierter und nicht aggregierter Abbildung führen.¹⁴⁰ Durch die Verwendung eines zellulären Automaten versucht [Schaub 91a] den Aggregationsabstand¹⁴¹ zwischen dem aggregierten Submodell der Abnutzung und dem restlichen Modell höherer Abbildungsebene zu verkleinern und damit die Aggregations- bzw. Deaggregationsprozesse zwischen den Teilmodellen zu vereinfachen. Im Unterschied dazu, verwenden [Cobb et al. 93] einen zellulären Automaten als Gefechtssimulationssystem, um damit den Nachweis zu erbringen, dass selbst komplexe militärische Operationen und Abnutzungsvorgänge mit Hilfe relativ einfacher Ansätze nachgebildet werden können. Für die Bewertung zellulärer Automaten als Mittel zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse interessiert im Folgenden jedoch hauptsächlich der Ansatz von [Schaub 91a] und die daraus resultierende Modelle ZEGA und ZELGAT.

4.4.2 Grundsätzliches zu zellulären Automaten

Die Entwicklung zellulärer Automaten geht auf eine Arbeit der Mathematiker John von Neumann und Stanislaw Ulam aus den frühen fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts zurück,¹⁴² welche das Ziel hatte, „selbst-reproduzierende Automaten“ als Modell biologischer Organismen zu schaffen. Die dabei gefundene Lösung basiert auf *einer rechteckigen Anordnung von Zellen*, wobei jede Zelle eine *endliche Zahl von Zuständen* annehmen kann, einer ebenfalls *endlichen Zahl von Regeln*, welche die möglichen Zustandsübergänge der Zellen beschreiben und der geeigneten Definition einer *Nachbarschaftsfunktion*. Von Neumann charakterisiert seinen ursprünglichen zellulären Automaten formal durch folgende Forderungen:¹⁴³

1. Eine unendliche Fläche ist in gleich große Quadrate unterteilt.
2. Jedes Quadrat enthält einen identischen endlichen Automaten. Das Quadrat in Kombination mit diesem endlichen Automaten wird dann als Zelle bezeichnet.
3. Jede Zelle α wird mit ihrer Nachbarschaft assoziiert. Diese Nachbarschaft ist die Menge bestehend aus der Zelle selbst und den vier direkten (nichtdiagonalen) Nachbarzellen.¹⁴⁴

¹⁴⁰ vgl. Kapitel 4.2.4 bzw. [Schaub 91a], S. 221ff

¹⁴¹ Als Aggregationsabstand definiert [Schaub 91a] den Unterschied zwischen den Aggregationsniveaus (d.h. dem jeweiligen Auflösungsgrad) verschiedener Modelle.

¹⁴² vgl. [von Neumann, Burks 66]

¹⁴³ vgl. etwa [Codd 68]

¹⁴⁴ Diese Form der Nachbarschaftsbeziehung wird als „von Neumann-Nachbarschaft“ oder „5er-Nachbarschaft“ bezeichnet (vgl. Abbildung 4.8).

4. Der Zustand einer Zelle α zum Zeitpunkt $t+1$ wird eindeutig bestimmt durch den Zustand der Nachbarschaft dieser Zelle zum Zeitpunkt t und der Übergangsfunktion f des endlichen Automaten dieser Zelle.
5. Der endliche Automat jeder Zelle α besitzt einen Ruhezustand v_0 , so dass $f(v_0, v_0, \dots, v_0) = v_0$ gilt.
6. Zu jedem Zeitschritt t befinden sich alle bis auf eine endliche Zahl der Zellen im Ruhezustand v_0 .

Die Zustandsübergänge eines zellulären Automaten finden ausschließlich in diskreten Zeitschritten statt. Diese werden allgemein als *Perioden*, *Generationen*, *Iterationen* oder auch *Zyklen* bezeichnet. Es lässt sich feststellen, dass ein so definierter zellulärer Automat damit die folgenden Eigenschaften besitzt:

- *Parallelität*: Alle Zellen ändern ihre Zustände jeweils gleichzeitig. Eine Wechselwirkung zwischen gleichzeitigen Zustandsänderungen findet nicht statt.
- *Lokalität*: Der neue Zustand einer Zelle basiert ausschließlich auf dem alten Zustand dieser Zelle und dem alten Zustand ihrer Nachbarzellen.
- *Homogenität*:¹⁴⁵ Für die Bestimmung der Zustandsübergänge aller Zellen werden die selben Regeln benutzt.

Ein wichtiger Teil der Definition eines zellulären Automaten ist die Festlegung der Nachbarschaft einer Zelle (vgl. Abbildung 4.8). Weiterführende Arbeiten haben die ursprüngliche Definition der „von Neumann-Nachbarschaft“ erweitert und damit weiträumigere Nachbarschaftsbeziehungen möglich gemacht. Solche vergrößerten Nachbarschaften sind vor allem auch für Gefechtssimulationssysteme wichtig, da sich etwa mit ihrer Hilfe die größere Reichweite moderner Waffensystemtypen abbilden lässt.

Da die Regeln für die Zustandsübergänge einer Zelle auf die definierte Nachbarschaftsbeziehung Bezug nehmen, kann offensichtlich derselbe Regelsatz bei einer unterschiedlichen Definition der Nachbarschaftsbeziehung zu einer unterschiedlichen Entwicklung des Gesamtzustandes¹⁴⁶ des Automaten führen.

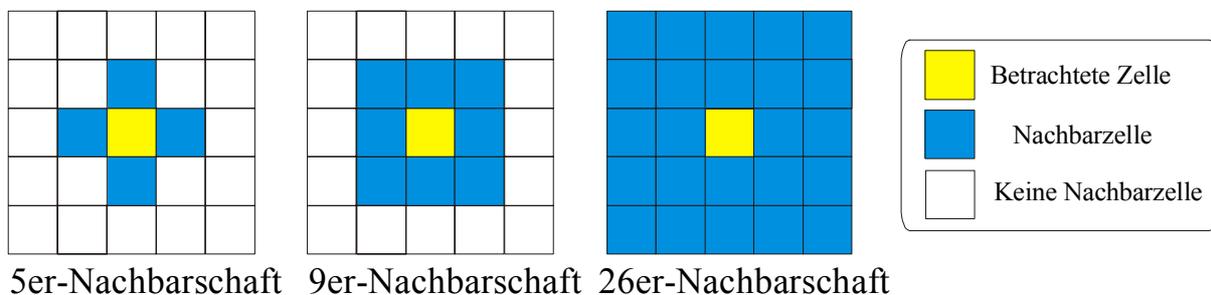


Abbildung 4.8: Mögliche Nachbarschaftsbeziehungen in zellulären Automaten

¹⁴⁵ In der Literatur auch als *Uniformität* oder *Isotropie* bezeichnet (vgl. [Schaub 91a], S. 226).

¹⁴⁶ Unter Gesamtzustand des Automaten soll hier die Summe der Zustände seiner Zellen verstanden werden.

4.4.2.1 Das „Game of Life“ von Conway

Als wahrscheinlich bekanntester zellulärer Automat gilt das „*Game of Life*“ des englischen Mathematikers J.H. Conway.¹⁴⁷ Conway’s „*Game of Life*“ ist ein 2-dimensionaler¹⁴⁸ zellulärer Automat mit einer beliebigen Größe des Zellgitters und angenommener 9er-Nachbarschaft. Die Zellen dieses Zellgitters können jeweils zwei Zustände (lebendig/tot) annehmen und verändern ihren Zustand aufgrund der folgenden drei Zustandsübergangsregeln:

1. *Geburt*: Besitzt eine „tote“ Zelle genau drei „lebende“ Nachbarzellen¹⁴⁹, so ändert sie ihren Zustand in der nächsten Periode ebenfalls zu „lebend“.
2. *Überbevölkerung*: Besitzt eine „lebende“ Zelle vier oder mehr „lebende“ Nachbarzellen,¹⁵⁰ so stirbt sie ab, d.h. sie ändert ihren Zustand in der nächsten Periode zu „tot“.
3. *Unterbevölkerung*: Besitzt eine „lebende“ Zelle keine oder nur eine „lebende“ Nachbarzelle,¹⁵¹ so stirbt sie ab, d.h. sie ändert ihren Zustand in der nächsten Periode zu „tot“.

Mit Hilfe dieser Regeln und geeigneter Startzustände lassen sich eine Vielzahl interessanter Muster erzeugen. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwischen stabilen, oszillierenden, d.h. ihre Form periodisch ändernden, und transitorischen, d.h. sich auf dem Zellgitter bewegendem Mustern (vgl. Abbildung 4.9).

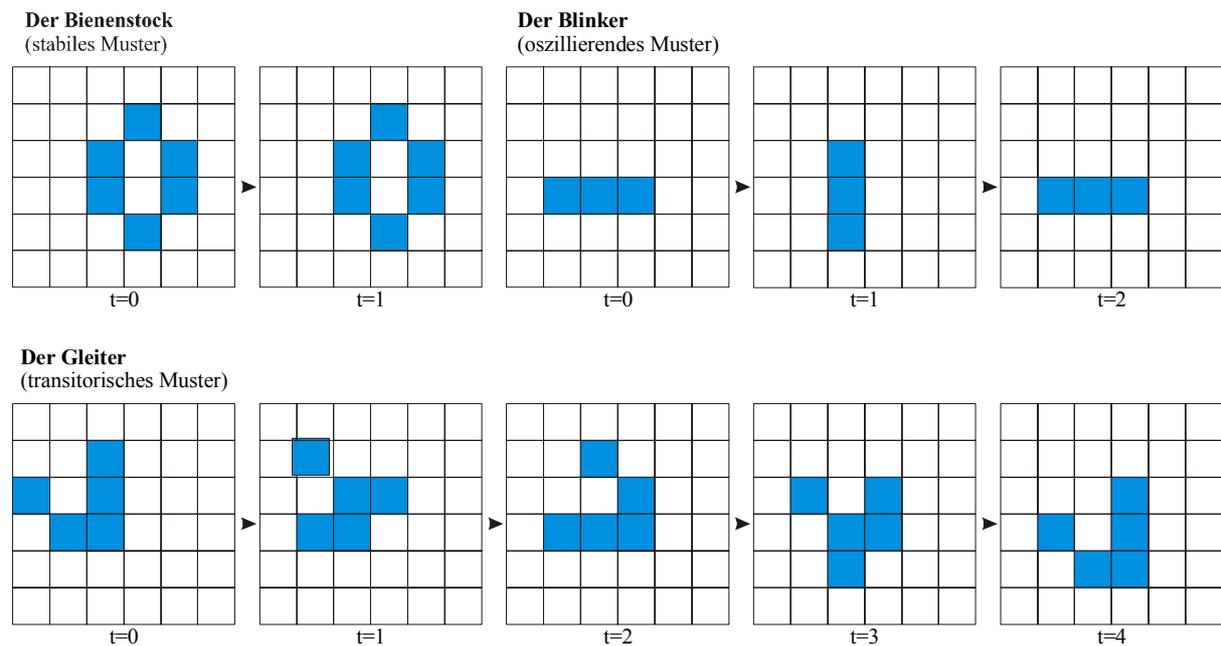


Abbildung 4.9: Muster aus Conway’s „*Game of life*“

¹⁴⁷ vgl. [Gardener 70]

¹⁴⁸ Es existieren auch 1-dimensionale bzw. 3- oder mehr-dimensionale Varianten des „*Game of Life*“.

¹⁴⁹ d.h. die Nachbarschaftsmenge dieser Zelle besitzt die Kardinalzahl 4

¹⁵⁰ d.h. die Nachbarschaftsmenge dieser Zelle besitzt die Kardinalzahl 5 oder größer

¹⁵¹ d.h. die Nachbarschaftsmenge dieser Zelle besitzt die Kardinalzahl 1 oder 2

4.4.2.2 Das „Black&White Game of Life“

Eine bekannte Variante des „*Game of Life*“, welche vielleicht als primitivste Vorform eines Gefechtssimulationssystems auf Basis eines zellulären Automaten gelten kann, ist das sogenannte „*Black&White Game of Life*“. Dieses modifiziert die Definition des ursprünglichen zellulären Automaten in zwei Punkten:

1. *Neue Zustandsmenge der Zellen*: Eine Zelle kann nun drei verschiedene Zustände einnehmen. Diese Zustände sind:
 - „tot“,
 - „lebendig und schwarz“ sowie
 - „lebendig und weiß“.
2. *Neue Zustandsübergangsregel*: Eine neugeborene Zelle erhält die Farbe der Mehrheit ihrer drei Elternzellen.

Ergänzt man diese Definition durch weitere Spielregeln, wie etwa:

Spielregel 1: Das Spiel wird abgebrochen, sobald eine der beiden Farben verschwindet, die verbleibende Farbe gilt als Sieger.

so kann man durch die Wahl geeigneter zweifarbiger Muster einen einfachen Abnutzungsprozess modellieren, der z.B. mit der Vernichtung einer der beiden Farben endet (vgl. Abbildung 4.10).¹⁵²

Das „*Black&White Game of Life*“ kann durch die Einführung weiterer Farben und entsprechender Zustandsübergangsregeln beliebig erweitert werden. Besonders interessant ist dabei die als „*Rainbow Game*“ bekannte Variante, bei welcher eine neugeborene Zelle die Farbe erhält, deren Farbcode innerhalb des RGB-Systems¹⁵³ dem arithmetischen Mittel der Farbcodes der Elternzellen entspricht.

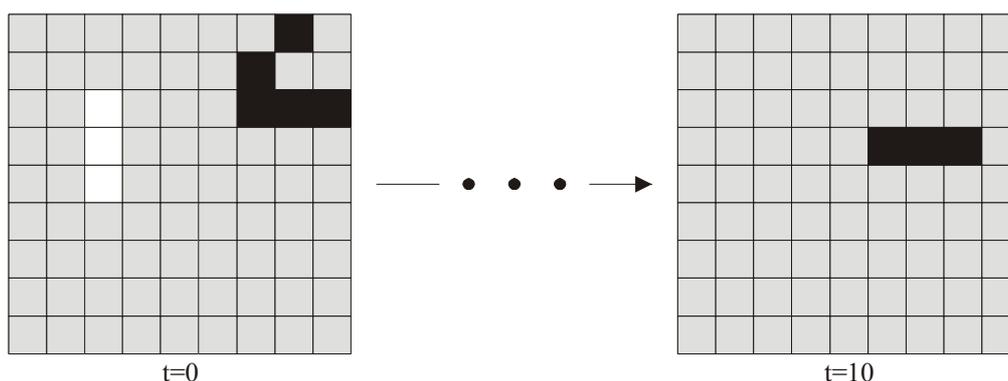


Abbildung 4.10: Schematischer Ablauf einer Partie „Black&White Game of Life“.
(Partei Weiß wird nach 10 Perioden vernichtet)

¹⁵² In dieser einfachen Form des „*Black&White Game of Life*“ ist es auch denkbar, dass beide Farben gleichzeitig verschwinden, bzw. dass stabile Zustände erreicht werden. Dies kann durch weitere geeignete Zustandsübergangs- und neue Spielregeln jedoch verhindert werden.

¹⁵³ Das RGB-System ist ein System zur Klassifizierung von Farben und orientiert sich an der Fähigkeit des menschlichen Auges, grundsätzlich Rot, Grün und Blau zu erkennen. Alle anderen Farben entstehen durch Mischungen der Einzelintensitäten dieser drei Primärfarben (vgl. etwa [Kappas 94]).

4.4.3 Das Gefechtssimulationssystem ZEGA

4.4.3.1 Modellbeschreibung

Schaub [Schaub 91a] entwickelt das aggregierte Gefechtssimulationssystem ZEGA¹⁵⁴ auf der Basis eines zellulären Automaten als Alternative zu dem Modell von Lanchester, nachdem sich im Rahmen seiner Arbeit gezeigt hatte, dass die Ermittlung von Lanchesterkoeffizienten für ein Modell höherer Abbildungsebene aus den Ergebnissen einer Einzelschusssimulation nicht zufrieden stellen kann. Schaub definiert dazu den zellulären Automaten wie folgt:

1. *Zellen und Zellzustände*: Die Zellen des Automaten repräsentieren das Gelände des Gefechtsfeldes (vgl. Abbildung 4.11), wobei eine Zelle einen Ausschnitt von 100m x 100m abbildet. Der Zustand jeder Zelle wird durch folgende Werte beschrieben:
 - den **Gelände-** bzw. **Bewuchstyp** der Zelle, wobei analog zu dem GSS BASIS die Typen *Wiese*, *Kussel*¹⁵⁵, *Wald*, *Ortschaft* und *Wasser* (jedoch keine Höhenangaben) unterschieden werden,
 - den **Typ**¹⁵⁶ und die **Anzahl** von **Waffensystemen**, welche sich in der Zelle aufhalten,
 - die **Seite** (Rot bzw. Blau), zu der die Waffensysteme in der Zelle gehören,
 - den **Zustand der Waffensysteme**, mit den möglichen Ausprägungen *bewegt (mit Richtung)*, *offen stehend* und *teilgedeckt stehend*,
 - den **Aktivitätsfaktor**¹⁵⁷ (A) der Waffensysteme in der Zelle und
 - den **Niederhaltefaktor** (N) der Waffensysteme in der Zelle.
2. *Zustandsübergangsfunktion der Zellen*: Die Zustandsübergangsfunktion von ZEGA unterscheidet zwei mögliche Klassen von Zustandsänderungen:
 - Übergänge, welche durch Abnutzung der gegnerischen Waffensysteme entstehen (**Abnutzungsphase**) und
 - Übergänge, welche aus der Bewegung von Waffensystemen und Zustandsänderungen wegen anderer Gründe (z.B. Übergang *offen stehend* zu *teilgedeckt stehend*) resultieren (**Bewegungsphase**).
3. *Startzustand des Automaten*: Der Startzustand des Automaten, d.h. die Belegung der Zellen zum Zeitpunkt $t=0$ ergibt sich aus der Umsetzung der Ausgangslage des militärischen Szenars, welches mit Hilfe des Automaten modelliert werden soll.¹⁵⁸

¹⁵⁴ ZEGA = **Z**ellulärer **G**efechts**a**utomat

¹⁵⁵ Als Kusselgelände bezeichnet man im militärischen Sprachgebrauch ein Gelände, welches mit Büschen und kleinen Bäumen mäßig dicht bewachsen ist.

¹⁵⁶ ZEGA unterscheidet zwischen den Waffensystemtypen *Kampf-* und *Schützenpanzer*.

¹⁵⁷ Der Aktivitätsfaktor beinhaltet gem. [Schaub 91a] die im letzten Zyklus realisierte taktische Kadenz der Waffensysteme dieser Zelle. Er wird genutzt, um die – durch den Waffeneinsatz hervorgerufene – Signaturerhöhung abzubilden, welche es feindlichen Waffensystemen erlaubt, aktive Waffensysteme leichter zu entdecken.

Wald Kein Waffensystem	Wald Kein Waffensystem	Wald 2 Spz (Rot) stehend teilgedeckt, (A,N),	Wald 2 Spz (Rot) stehend teilgedeckt, (A,N),	Wiese 1 Kpz (Rot), stehend teilgedeckt, (A,N)
Wald Kein Waffensystem	Wald 1 Kpz (Rot), stehend teilgedeckt, (A,N)	Kussel Kein Waffensystem	Kussel Kein Waffensystem	Wiese Kein Waffensystem
Kussel Kein Waffensystem	Wiese Kein Waffensystem	Wiese Kein Waffensystem	Ortschaft ↑ 2 Kpz (Blau) bewegt (A,N)	Ortschaft Kein Waffensystem
Wasser Kein Waffensystem	Wasser Kein Waffensystem	Wasser Kein Waffensystem	Ortschaft ↑ 2 Kpz (Blau) bewegt (A,N)	Wiese Kein Waffensystem

Abbildung 4.11: Exemplarische Ausgangslage in ZEGA (4 Schützenpanzern (SPz) und 2 Kampfpanzern (KPz) (Rot) liegen am Waldrand in Stellung, 4 KPz (Blau) greifen durch die Ortschaft hindurch an (nach [Schaub 91a])

Die Bewegungsphase in ZEGA wird in [Schaub 91a] nur insoweit modelliert, als sie zur Abbildung der zu untersuchenden Szenarien notwendig ist. Den wesentlichen Teil des neuen Modells stellt die Modellierung der Abnutzungsphase dar. In jedem Zeitschritt wird jede nichtleere Zelle des Automaten als sogenannte *Verursacherzelle* betrachtet, d.h. die Wirkung der Waffensysteme innerhalb dieser Zelle auf ihre Nachbarschaft wird ermittelt.¹⁵⁹ Der Begriff der Nachbarschaft ist in diesem Zusammenhang nicht konstant, sondern in Abhängigkeit von Waffenreichweite, Zustand des Waffensystems und Sichtbarkeit dynamisch definiert und kann sich damit im Laufe der Zeit ändern. Der Ablauf einer solchen Wirkungsberechnung für eine *Verursacherzelle* erfolgt dabei in drei Schritten:

1. Es findet eine *priorisierte Verteilung des Feuerpotentials* der Verursacherwaffensysteme der Zelle auf das Erleiderpotential der Ziele statt.
2. Durch das zugeteilte Feuerpotential *verursachte Ausfälle werden ermittelt*.
3. Die *erzeugten Ausfälle* werden auf die verschiedenen Zielzellen *verteilt*.

Für die *priorisierte Verteilung des Feuerpotentials* ermittelt ZEGA zuerst das Verursacherpotential einer Zelle durch:

¹⁵⁸ [Hofmann M. 2000] weist drauf hin, dass dieser Startzustand des Automaten implizit auch die Ausgangstaktik bestimmt, da der taktische Ansatz eines angreifenden Verbandes vollständig durch die anfänglichen Bewegungszustände bestimmt sein muss.

¹⁵⁹ Formal betrachtet löst sich ZEGA in diesem Punkt von der Theorie der zellulären Automaten, da hier die Zustandsänderungen der Nachbarzellen in Abhängigkeit des Zustands der Verursacherzelle ermittelt werden. Die normale Vorgehensweise in zellulären Automaten ist aber, wie beschrieben, genau umgekehrt.

$$VPot = \frac{(Anz_WS - Anz_nh) * Kad(Deckungszustand) * Zeitschritt}{60} \quad (4.25)$$

wobei

- $VPot$ = Verursacherpotential in Schüssen der Hauptwaffe
 Anz_WS = Anzahl der Waffensysteme in der Zelle
 Anz_nh = Anzahl der im letzten Zyklus niedergehaltenen Waffensysteme
 Kad = Technische Kadenz der Hauptwaffe des Waffensystems in Abhängigkeit vom aktuellen Deckungszustand in Schüsse pro Waffensystem und Minute
 $Zeitschritt$ = Länge des Zeitschritts des Automaten in [sek]

Danach wird das *Erleiderpotential* der Erleiderzellen unter Berücksichtigung bestehender Sichtverbindungen, der Anzahl an entdeckten Feindwaffensystemen und weiterer Daten berechnet und das bereits ermittelte Verursacherpotential anhand ebenfalls berechneter Bekämpfungsprioritäten¹⁶⁰ darauf verteilt.

Für die *Ermittlung der Anzahl und Art der verursachten Ausfälle* wird zunächst die Treffwahrscheinlichkeit $p(h)$ in Abhängigkeit von

- den Waffensystemtypen des Verursachers und des Erleiders,
- dem Bewegungszustand des Verursachers,
- dem Bewegungs- und Deckungszustand des Erleiders sowie
- der aktuellen Entfernung zwischen Verursacher und Erleider

und anschließend wiederum anhand der Waffensystemtypen des Verursachers und des Erleiders die bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit $p(k/h)$ im Falle eines Treffers, für diese Duellpaarung bestimmt. Mit Hilfe der $p(h)$, $p(k/h)$, der Anzahl abgegebener Schüsse sowie der Anzahl potentieller Erleiderwaffensysteme wird danach die Anzahl an Ausfällen und niedergehaltenen¹⁶¹ Waffensystemen berechnet.

Das ermittelte Feuerpotential wird jeweils auf die Gesamtzahl entdeckter Waffensysteme eines Waffensystemtyps verteilt. Die Berechnung der Ausfälle eines Waffensystemtyps erfolgt in ZEGA damit global für alle entdeckten Systeme dieses Typs und nicht lokal in Abhängigkeit der Anzahl an Waffensystemen pro Erleiderzelle. Die *Verteilung der ermittelten Ausfälle*¹⁶² hat damit die Aufgabe, jeder Zelle denjenigen Anteil an Ausfällen und Niederhalteereignissen zuzuteilen, der dem Anteil der in dieser Zelle entdeckten Waffensysteme an der Gesamtzahl der entdeckten Waffensysteme dieses Typs entspricht.

Für das Verständnis und die Bewertung des Modells ZEGA ist es wichtig festzuhalten, dass wesentliche Teile der Abnutzungsphase – konkret das Entdeckungsmodell für die Berechnung der entdeckten Waffensysteme und das Wirkungsmodell für die Ermittlung der verursachten

¹⁶⁰ Die Bekämpfungsprioritäten in ZEGA ist eine gewichtete Kombination aus Waffensystem- und Entfernungspriorität. Die Waffensystemprioritäten sind vordefinierter Eingabedaten, welche die Prioritäten beschreiben, mit denen ein Waffensystemtyp unterschiedliche gegnerische Waffensystemtypen bekämpft. Die Entfernungsprioritäten berechnen sich aus dem euklidischen Abstand zwischen Verursacher- und Erleiderzelle.

¹⁶¹ Ein Waffensystem gilt in ZEGA als niedergehalten, wenn es getroffen, dadurch aber nicht vernichtet wird.

¹⁶² vgl. [Schaub 91a], S.239-240

Ausfälle auf Basis von $p(h)$ und $p(k/h)$, sowohl deterministisch als auch stochastisch als Monte-Carlo Simulation realisiert wurden. [Schaub 91a] stellt dabei fest, dass die Modellphilosophie eines zellulären Gefechtsautomaten es im Gegensatz zu einem hochauflösenden Gefechtssimulationssystem wie etwa BASIS leicht möglich macht, eine stochastische und eine deterministische Version zu realisieren und bei Bedarf zwischen beiden Version zu wählen. Schaub führt diesen Vorteil zellulärer Gefechtsautomaten vor allem darauf zurück, dass die Wirkungsberechnung nicht auf individuellen Waffensystemen, sondern nur auf der jeweiligen Anzahl der Waffensysteme eines Typs basiert und damit prinzipiell auch nicht-ganzzahlige Werte im deterministischen Modell berücksichtigt werden können. Weiterhin weist Schaub darauf hin, dass ZEGA nur über zwei Teilmodelle verfügt, die Zufallseinflüssen unterliegen und in deterministische Versionen überführt werden müssen.

4.4.3.2 Bewertung des Modells

[Schaub 91a] erbringt anhand von Versuchsläufen mit zwei prototypischen Szenarien den Nachweis, dass das Modell ZEGA in der Lage ist, sowohl den Verlauf der Abnutzung als auch die Endstärken der am Gefecht beteiligten Parteien des hochauflösenden Einzelschussimulationssystems BASIS gut zu approximieren und dass die Güte dieser Approximation robust gegenüber Szenaränderungen ist. Schaub zeigt damit, dass ZEGA als zellulärer Gefechtsautomat besser dazu geeignet ist, die Ergebnisse eines hochauflösenden Einzelschussimulationssystems für ein Simulationssystem höherer Abbildungsebene zu approximieren, als ein Modell mit heterogenem Lanchesteransatz. Schaub weist jedoch auch darauf hin, dass die hohe Güte der Approximation der Abnutzungsverläufe erst durch eine intensive Kalibrierung der Eingabedaten von ZEGA erreicht werden konnte, welche nur in einem komplexen, iterativen und vor allem nicht zu automatisierenden Verfahren gelang. Wie [Hofmann M. 2000] bemerkt, stellt dies eine wesentliche Beschränkung der Verwendungsfähigkeit von ZEGA dar. Reihenuntersuchungen zu Analysezwecken, welche zehntausende von Simulationläufen mit wechselnden Szenarien notwendig machen, können ohne automatisierte Kalibrierung und Integration des Abnutzungsmodells nicht in einer vertretbaren Zeit durchgeführt werden.¹⁶³ Weiter muss festgestellt werden, dass auch ZEGA nicht in der Lage ist, innerhalb eines modernen hochauflösenden Gefechtssimulationssystems wesentliche Einflussgrößen des Abnutzungsprozess im Gefecht der verbundenen Waffen zu berücksichtigen. Die hohe Dynamik moderner Gefechtsführung, die aus der gesteigerten Mobilität neuer Waffensysteme resultiert, kann nur unzureichend abgebildet werden. Human Factors und C⁴I-Prozesse werden – genau wie das Auftreten von Synergieeffekten beim Einsatz unterschiedlichster Waffensystemtypen – überhaupt nicht abgebildet. Mit dem Abnutzungsmodell von ZEGA ist es weiterhin nur schwer möglich, die Wirkung von Feuerkoordinierungs- und Zielverteilungsmaßnahmen innerhalb von Teileinheiten oder Einheiten, wie etwa die explizite Zielansprache durch den Zugführer oder die Vorgabe von Bekämpfungstreifen durch den Kompaniechef, zu berücksichtigen.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass ZEGA für den Einsatz zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse unzureichend erscheint, da dafür wesentliche Aspekte des Gefechtsprozesses aufgrund der ursprünglichen Aufgabenstellung des Modells fehlen oder nur rudimentär berücksichtigt werden. Diese Bewertung sollte jedoch nicht als generelle Kritik an dem Modell verstanden werden, da ZEGA die von Schaub beabsichtigte Aufgaben weitestgehend zufriedenstellend erfüllt und damit seiner ursprünglichen Zielsetzung gerecht wird.

¹⁶³ [Hofmann M. 2000] stellt weiter fest, dass diese Beschränkung von ZEGA in den Jahren 1993 bis 1995 am IASFOR u.a. dazu geführt hat, dass die Studie „Stable-Defense“ (vgl. [NATO 95]) mit dem GSS KOSMOS durchgeführt wurde, welches einen heterogenen Lanchesteransatz nutzt. Die dabei betrachteten ca. 15.000 Simulationläufe wären mit ZEGA in der verfügbaren Zeit nicht zu realisieren gewesen.

4.4.4 Das Gefechtssimulationssystem ZELGAT

4.4.4.1 Modellbeschreibung

Um zu untersuchen, ob die beschriebenen Einschränkungen von ZEGA modellspezifischer Natur oder für Gefechtssimulationssysteme auf Basis eines zellulären Automaten typisch sind, wurde am IASFOR von Marks, und Schlagowsky [Marks, Schlagowsky 96] das Nachfolgemodell ZELGAT¹⁶⁴ entwickelt. ZELGAT unterscheidet sich von dem Modell ZEGA im wesentlichen durch eine detailliertere Geländeabbildung, eine Berücksichtigung des Geländes in der Bewegungsphase und einen anderen Ansatz für die Modellierung der Abnutzungsphase.

Die Definition des Modells ZELGAT wird gegenüber ZEGA um die folgenden Punkte erweitert:

- Neben einem der fünf bekannten Gelände- bzw. Bewuchstypen *Wiese*, *Kussel*, *Wald*, *Ortschaft* und *Wasser* wird jeder Zelle in ZELGAT eine **Höhenangabe** zugeordnet. Damit ist es möglich, die Welligkeit eines Geländes mit einer gewissen Auflösungsgenauigkeit¹⁶⁵ abzubilden und damit höhenabhängige Sichtlinienberechnungen durchzuführen.
- Die Menge der möglichen **Waffensystemtypen** wird um den Typ *Infanterie* ergänzt.
- In der *Bewegungsphase* wird anhand des Gelände- bzw. Bewuchstyps für jede Zelle ein **Widerstandswert** ermittelt. Dieser Widerstandswert wird genutzt um die Zeit zu berechnen, welche ein Waffensystem benötigt um sich in diese Zelle zu bewegen.
- Der Abnutzungsvorgang in ZELGAT gliedert sich in **Aufklärungs-** und **Bekämpfungsphase**. Beide Phasen sind dabei als Monte-Carlo Simulationen realisiert.
- Die Berechnung der Feuerwirkung geschieht in ZELGAT mit Hilfe eines – gegenüber ZEGA vereinfachten – zweistufigen Modells.

1. *Bestimmung der Feuerwirkung einer Verursacherzelle*: ZELGAT unterscheidet dazu zwischen dem linearen Wirkungsmodell

$$FW = a \cdot (100 - Panz) + b \cdot (100 - (10 \cdot Entr)) + c \cdot 20 \cdot (6 - Entf) \quad (4.26)$$

sowie dem quadratischen Wirkungsmodell

$$FW = a \cdot (100 - Panz) + b \cdot (100 - (10 \cdot Entr)) + c \cdot 4(25 - Entf \cdot Entf) \quad (4.27)$$

wobei jeweils gilt:

$$\begin{aligned} FW &= \text{Feuerwirkung in Schadenspunkten } (0 \leq FW \leq 100) \\ Panz &= \text{Panzerung der Zielzelle } (0 \leq Panz \leq 100) \\ Entr &= \text{Tarnwert der Zielzelle } (0 \leq Entr \leq 10) \\ Entf &= \text{Entfernung zwischen Verursacher- und Zielzelle } (0 \leq Entf \leq 5) \end{aligned}$$

¹⁶⁴ ZELGAT = **Z**ellulärer **G**efechts**a**utomat

¹⁶⁵ ZELGAT erlaubt die Unterscheidung von 200 verschiedene Höhenstufen, relativ zu der geringste Höhe (über N.N.) in dem abgebildeten Gelände (die geringste Höhe wird grundsätzlich als kleinste Höhenstufe definiert).

- a = Gewichtung des Panzerungswertes in der Wirkungsberechnung ($0 \leq a \leq 1$)
- b = Gewichtung des Tarnwertes in der Wirkungsberechnung ($0 \leq b \leq 1$)
- c = Gewichtung der Entfernung in der Wirkungsberechnung ($0 \leq c \leq 1$)

und

$$a + b + c = 1.$$

Während bei Benutzung des linearen Wirkungsmodells die Feuerwirkung mit steigender Entfernung zwischen Verursacher- und Zielzelle linear abnimmt, erlaubt das quadratische Modell eine differenziertere Modellierung der Feuerwirkung in Abhängigkeit von der Entfernung (vgl. Abbildung 4.12). Mit Hilfe des quadratischen Wirkungsmodells ist es zum Beispiel möglich, ansatzweise eine optimale Bekämpfungsentfernung abzubilden.

Die Wahl, welches der beiden Modelle im konkreten Fall zur Wirkungsberechnung eingesetzt wird, überlässt ZELGAT dem Benutzer.

2. *Bestimmung des durch die Feuerwirkung verursachten Schadens*: Im Gegensatz zu ZEGA führt ZELGAT für die Bestimmung der verursachten Ausfälle keine Einzelschussbetrachtung durch. Der Schaden, welcher dem Waffensystem auf der Zielzelle zugefügt wird, errechnet sich in Abhängigkeit von der ermittelten Feuerwirkung nach der Formel:

$$SW = (d + e) \cdot FW \tag{4.28}$$

wobei gilt

- SW = Schaden in [Schadenspunkten] ($0 \leq SW \leq 100$)
- FW = Feuerwirkung in [Schadenspunkten] ($0 \leq FW \leq 100$)
- d = Stets als Schaden realisierter Anteil der Feuerwirkung ($0 \leq d \leq 1$)
- e = Mit Hilfe einer Gleichverteilung zufällig bestimmter Anteil der Feuerwirkung, welcher neben dem stets als Schaden realisierten Anteil $d \cdot FW$ ebenfalls als Schaden realisiert wird ($0 \leq e \leq 1 - d$)

und offensichtlich

$$d \cdot FW \leq SW \leq FW$$

Der so ermittelte Schaden wird auf das bisherige Schadensniveau des Waffensystem der Erleiderzelle addiert. Überschreitet dieses Schadensniveau einen vordefinierten Schwellwert, so gilt das Waffensystem als ausgefallen. Eine Betrachtung von Niederhaltungswirkung, wie etwa in ZEGA, findet hierbei nicht statt. Ein Waffensystem in ZELGAT bleibt bis zu seinem Ausfall stets voll einsatzfähig.

- ZELGAT enthält einfache **Führungsautomaten**, welche die Abbildung der fundamentalen taktischen Handlungen „geführtes Bewegen“ und „geregelter Feuerverteilung“ ermöglichen. Das Modell arbeitet zu diesem Zweck mit speziellen „Führungselementen“, welche explizit auf dem Gefechtsfeld dargestellt werden und aufgrund einer erweiterten Nachbarschaftsfunktion gegenüber normalen Waffensystemen prinzipiell über mehr Informationen bezüglich des Geländes und des Gegners verfügen, welche dann von geeigneten Expertenprogrammen verarbeitet werden.

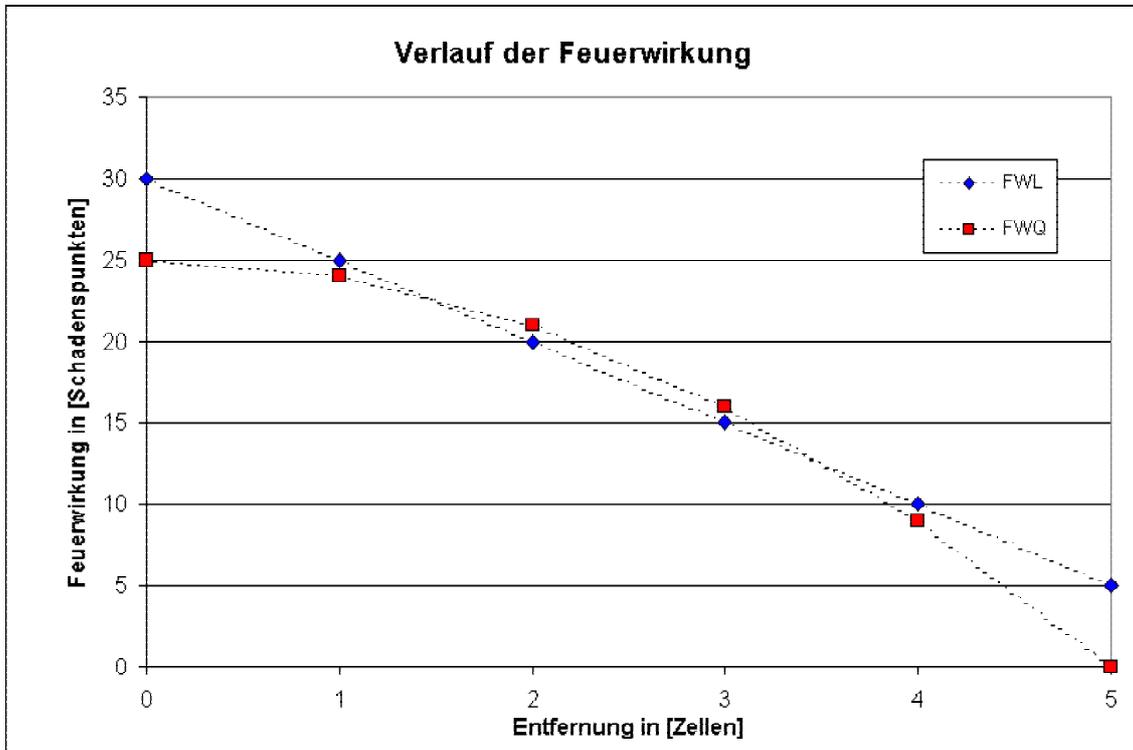


Abbildung 4.12: Beispielhafter Verlauf der Feuerwirkung für das lineare (FWL) und quadratische (FWQ) Wirkungsmodell in ZELGAT ($Panz = 100$, $Entr = 10$, $a=0.3$, $b=0.45$, $c=0.25$)

4.4.4.2 Bewertung des Modells

[Marks, Schlagowsky 96] gelingt mit ZELGAT analog zu [Cobb et al. 93a] der Nachweis, dass zelluläre Automaten gut dafür geeignet sind, historische Gefechte und die dabei verwendeten Taktiken nachzubilden. [Hofmann M. 2000] weist aber darauf hin, dass sich die Umsetzung taktischer Regeln in die benötigten abstrakten Zustandsübergangsregeln bei der Entwicklung von ZELGAT als wesentliches Problem erwiesen hat. Besonders die Abbildung räumlich und zeitlich ausgedehnter Operationen kann dabei aufgrund der lokalen Nachbarschaftsbetrachtungen solcher Zustandsübergangsregeln nur schwer realisiert werden. Bei einer notwendigen weiteren Delokalisierung bzw. Dynamisierung der für zelluläre Automaten charakteristischen Nachbarschaftsbeziehung würde sich nach Ansicht des Autors jedoch die Frage stellen, ob ein Festhalten an dem Ansatz zellulärer Automaten generell noch gerechtfertigt ist. Festzustellen bleibt, dass ZELGAT gegenüber ZEGA vor allem in der Abbildung des Geländes und einfacher Führungsprozesse deutliche Fortschritte zeigt. Für den Einsatz zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in einem hochauflösenden Gefechtssimulationssystem erscheint aber auch ZELGAT aus den bereits bei der Bewertung des Modells ZEGA genannten Gründen als unzureichend.

4.4.5 Das Gefechtssimulationssystem ISAAC

4.4.5.1 Modellbeschreibung

Das Modell ISAAC¹⁶⁶ wird in diesem Rahmen der Vollständigkeit halber vorgestellt, um aufzuzeigen, dass zelluläre Automaten auch bei der aktuellen Entwicklung moderner¹⁶⁷ Gefechtssimulationssysteme eine Rolle spielen.

Ilachinski [Ilachinski 97] entwickelt ISAAC als Alternative zu dem Ansatz von Lanchester, da er diesen als ungeeignet für die Abbildung moderner Gefechtsführung beurteilt. Er stellt in diesem Zusammenhang fest:

In particular, the Lanchesterian view of combat does not adequately represent the [United States] (Anm. des Verfassers) Marine Corps' vision of combat: small, highly trained, well-armed autonomous teams working in concert, continually adapting to changing conditions and environments.

Aus dieser Sichtweise ergibt sich die Forderung nach einem Modell, welches primär für die Untersuchung von Aspekten selbstorganisierenden Verhaltens von Kleingruppen in modernen Gefechten genutzt werden soll. Um diese Anforderung zu erfüllen, kombiniert Ilachinski in dem Modell ISAAC den beschriebenen Ansatz der zellulärer Automaten mit der jüngeren Theorie mobiler, intelligenter Agenten¹⁶⁸. Den Kernpunkt des Modells bildet die Definition sogenannter ISAAC-Agenten (ISAACA), welche sich auf dem Zellgitter des Gefechtsfelds bewegen können. Sie ersetzen die endlichen Automaten der ursprünglichen Definition zellulärer Automaten¹⁶⁹ und haben die Aufgabe, die elementaren Gefechtsobjekte abzubilden. Ein solcher ISAAC-Agent wird dabei durch die folgenden Eigenschaften und Fähigkeiten charakterisiert:

- Einen vorgegebenen Satz *lokaler Regeln*, welche das Verhalten des ISAACA innerhalb der generischen Umgebung in Abhängigkeit von seiner lokalen Umgebung spezifizieren.
- Eine Menge von *Missionszielen*, welche sein Verhalten in die gewünschten Bahnen lenken sollen.
- Eine Anzahl von *Sensoren*, die den ISAACA mit einem aktuellen Lagebild seiner lokalen Umgebung versorgen.
- Die *Fähigkeit*, das eigene Verhalten bzw. die Regeln, welche dieses Verhalten bestimmen, aufgrund von Erfahrungen zu *modifizieren*.

Ilachinski erweitert damit durch die Einführung der ISAAC Agenten die herkömmlichen Definition zellulärer Automaten in zwei wesentlichen Punkten:

1. Im Unterschied zu herkömmlichen Gefechtssimulationssystemen auf der Basis zellulärer Automaten, werden die *Waffensysteme in ISAAC* nicht mehr implizit durch die entspre-

¹⁶⁶ ISAAC=Irrreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat

¹⁶⁷ ISAAC wird seit etwa Mitte der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts am Center for Naval Analyses in Fort Avenue, Alexandria, Virginia entwickelt.

¹⁶⁸ Für eine Einführung in die Verwendung intelligenter Agenten in Gefechtssimulationssystemen siehe [Banks, Stytz 2000] oder [Jennings, Wooldrige 94].

¹⁶⁹ vgl. Kapitel 4.4.2, S. 79

chenden Zustände der Zellen sondern explizit durch eigenständige Objekte – *die ISAAC-Agenten* – repräsentiert.

2. Die *Menge der Zustandsübergangs- bzw. Verhaltensregeln*, welche die Evolution des zellulären Automaten, d.h. die Entwicklung des Gefechts bestimmen, *ist nicht unveränderlich*, da jeder ISAAC-Agent über die Fähigkeit zur individuellen Modifizierung dieser Regelsätze verfügt. Insbesondere die Eigenschaft der *Homogenität* ist damit nicht mehr gegeben.

Die Eigenschaften der *Parallelität* und *Lokalität* zellulären Automaten werden dagegen beibehalten. ISAAC definiert dazu für jeden Agenten die folgenden fünf Nachbarschaftsbeziehungen (vgl. Abbildung 4.13)¹⁷⁰:

1. *Aufklärungs-Nachbarschaft* (r_A): Durch die vorgegebene Reichweite der Sensoren bestimmte Menge von Nachbarschaftszellen, innerhalb derer ein ISAACA andere Agenten aufklären kann.
2. *Bekämpfung-Nachbarschaft* (r_B): Durch die vorgegebene Reichweite der Waffensysteme bestimmte Menge von Nachbarschaftszellen, innerhalb derer ein ISAACA andere Agenten bekämpfen kann.
3. *Verhaltens-Nachbarschaft* (r_V): Bei der Entscheidung über das Verhalten in einem Zeitschritt, werden durch einen ISAACA nur solche Agenten (feindliche und eigene) berücksichtigt, welche sich innerhalb dieser Menge von Nachbarschaftszelle befinden.
4. *Bewegungs-Nachbarschaft* (r_M): Durch die vorgegebene Bewegungsreichweite bestimmte Menge von Nachbarschaftszellen, zu denen sich eine ISAACA innerhalb eines Zeitschritts bewegen kann.
5. *Kommunikations-Nachbarschaft* (r_K): Durch die vorgegebene Reichweite der Kommunikationsmittel eines Agenten definierte Menge von Nachbarschaftszellen, innerhalb derer ISAACA einer Partei die jeweils gesammelten Informationen austauschen.

Die Modellierung der Abnutzungsprozesse zwischen feindlichen ISAAC-Agenten ist in der bisherigen Modellversion nur prototypisch realisiert worden:

1. Während der *Abnutzungsphase* eines Zeitschritts feuert jeder ISAACA simultan auf alle bzw. eine optional vorgegebene Maximalzahl feindlicher Agenten, welche sich innerhalb seiner *Bekämpfung-Nachbarschaft* aufhalten. Wird eine Maximalzahl vorgegeben, so wird diese Zahl von Agenten aus der Menge aller Agenten innerhalb der Bekämpfung-Nachbarschaft zufällig ausgewählt. Eine Priorisierung des Zielauswahlprozesses findet nicht statt.
2. Anhand einer vorgegebenen *Einzelssusstreffwahrscheinlichkeit* wird für jeden abgegebene Schuss ermittelt, ob es sich um einen Treffer handelt. Verfehlt ein Agent sein eigentliches Ziel, so kann optional durch einen weiteren Zufallsprozess ermittelt werden, ob ein Agent der eigenen Partei durch diesen Schuss irrtümlich getroffen wurde. Zu diesem

¹⁷⁰ Die Abbildung zeigt die verschiedenen Nachbarschaftsbeziehungen beispielhaft in der Reihenfolge $r_K > r_A > r_B > r_V > r_M$. Diese Reihenfolge ist jedoch nicht global vorgegeben und kann durch den Bediener für jeden ISAACA beliebig festgelegt werden.

Zweck wird eine vorgegebene Nachbarschaft um das Ziel betrachtet und ein zu der Partei des Schützen gehörender Agent zufällig ausgewählt. Für diesen Agenten wird dann anhand einer *Friendly-Fire-Wahrscheinlichkeit* ermittelt, ob er getroffen wurde.

3. Wird ein ISAACA durch einen anderen Agenten getroffen, so wird sein Status um eine Stufe gesenkt. ISAAC unterscheidet bei der Beschreibung des Status eines Agenten zwischen den drei Stufen *alive*, *injured* und *dead*. Agenten, welche sich im Zustand *injured* befinden, können nach Vorgabe des Benutzers Abzügen bei der Trefferermittlung unterliegen, d.h. sie treffen mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit.
4. ISAAC verfügt zusätzlich über die Fähigkeit, einen *Panzerungsgrad* und *Erholungs-* bzw. *Reparaturgrad* eines individuellen Agenten zu modellieren. Der *Panzerungsgrad* ist ein benutzerdefiniertes Eingabedatum, welches bestimmt, wie oft ein Agent getroffen werden muss, bevor sich sein Status verschlechtert. Der *Erholungs-* bzw. *Reparaturgrad* eines Agenten gibt an, wie viele Zeitschritte vergehen müssen, ohne dass der Agent getroffen wird, damit sich sein Status wieder von *injured* zu *alive* erhöht.

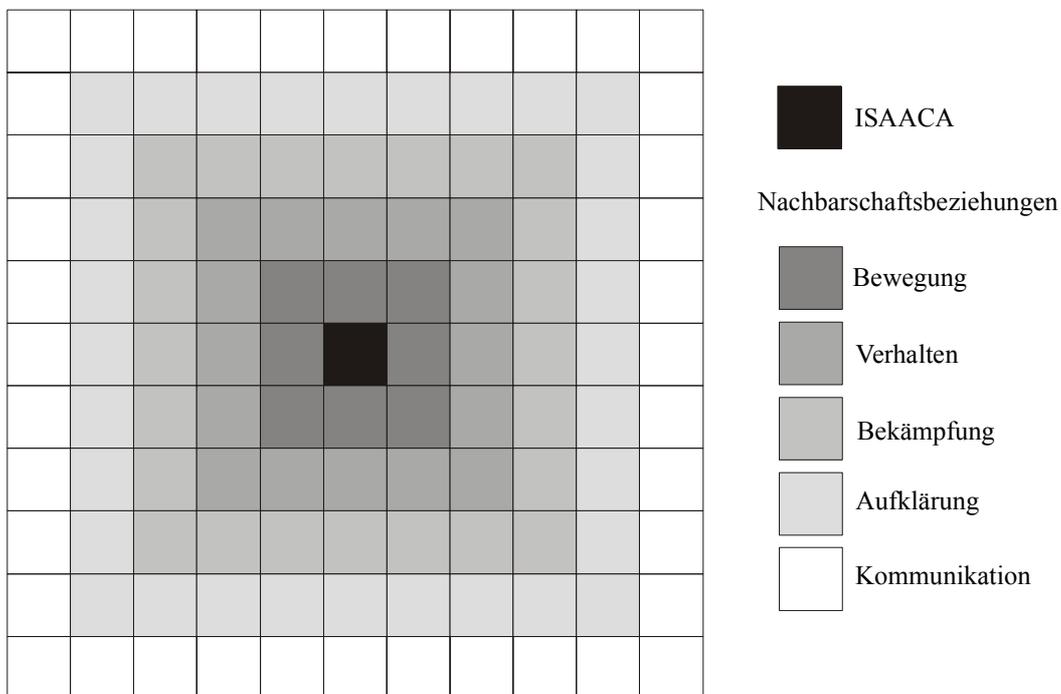


Abbildung 4.13: Nachbarschaftsbeziehungen eines ISAAC Agenten

4.4.5.2 Bewertung des Modells

Ilachinski [Ilachinski 97] gelingt mit ISAAC der Nachweis, dass der von ihm vorgeschlagene Ansatz – die Kombination von zellulären Automaten und intelligenten Agenten in einem Gefechtssimulationssystem – geeignet ist, Verhaltensweisen autonomer Gefechtsobjekte und grundlegende Taktiken in lokal begrenzten Gefechten nachzubilden. Zusammenfassend kann darüber hinaus festgestellt werden, dass das Modell ISAAC gegenüber ZEGA und ZELGAT einen erheblichen Fortschritt bei der Abbildung von *Human Factors* und *C⁴I-Prozesse* darstellt, die Modellierung der eigentlichen Gefechtsprozesse *Aufklärung*, *Bekämpfung* und *Bewegung* aber nur rudimentär enthalten ist. Als Vorbild für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse innerhalb eines hochauflösenden Gefechtssimulationssystems erscheint ISAAC deshalb in seiner vorliegenden Form noch als ungeeignet. Um diese Nachteile zu überwinden wären aus Sicht des Autors vor allem die folgenden Erweiterungen notwendig:

1. Berücksichtigung *waffensystemspezifischer Daten*¹⁷¹,
2. eine genauere Modellierung des *Bekämpfungs*-¹⁷² und *Aufklärungsprozesses*¹⁷³ sowie
3. eine detaillierte *Modellierung des Gefechtsfeldes* unter Berücksichtigung von Höhen und Bewuchs- bzw. Bebauungstypen.

Abschließend muss jedoch noch einmal festgehalten werden, dass ISAAC vor dem Hintergrund einer fest vorgegeben Aufgabenstellung entwickelt wurde und primär zur Abbildung selbstorganisierenden und autonomen Verhaltens im Gefecht verwendet werden soll. Die aufgezeigten Mängel des Modells für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse resultieren deshalb aus dieser unterschiedlichen Aufgabenstellung und sind nicht als allgemeine Kritik an dem Modell ISAAC zu verstehen.

Darüber hinaus befindet sich mit dem Modell EINSTEIN¹⁷⁴ eine wesentlich verbesserte Version von ISAAC in der Endphase der Entwicklung. Für dieses Modell liegen jedoch noch keine weitergehenden Forschungsergebnisse vor, so dass auf eine Vorstellung und Bewertung von EINSTEIN im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden muss.

¹⁷¹ z.B. Länge, Höhe, Breite des Waffensystems

¹⁷² etwa durch systemspezifische Waffenstreuungen, Vernichtungswahrscheinlichkeiten, etc.

¹⁷³ etwa durch Sichtlinienbestimmungen, die Berücksichtigung von Tarnwerten und Entdeckungswahrscheinlichkeiten, etc.

¹⁷⁴ EINSTEIN = Enhanced ISAAC Neural Simulation Tool

4.4.6 Abschließende Bewertung

Die vorgestellten Arbeiten haben gezeigt, dass Gefechtssimulationssysteme auf der Basis zellulärer Automaten gut geeignet sind, mit Hilfe relativ kleiner und einfacher Regelsätze militärische Verhaltensweisen und historische Gefechte¹⁷⁵ abzubilden.

Für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen müssen solche Modelle jedoch aufgrund der grundlegenden Eigenschaften zellulärer Automaten als eher ungeeignet bewertet werden. Als besonders hinderlich hat sich das Einhalten der *Lokalität* zellulärer Automaten und die damit verbundene Definition der Nachbarschaftsbeziehung erwiesen. Moderne Waffensysteme verfügen im Regelfall über sehr große Reichweiten und sind damit in der Lage, auch weit entfernte Zellen bzw. Objekte zu beeinflussen. [Schaub 91a] und [Ilachinski 97] haben zumindest prototypisch nachgewiesen, dass es mit Hilfe stark erweiterter und dynamischer Nachbarschaftsbeziehungen prinzipiell möglich ist, auch solche Waffensysteme abzubilden. Fraglich ist jedoch, ob die große Menge von Zellen, welche durch diese neuen Nachbarschaftsbeziehungen erfasst werden, noch in sinnvoller Weise innerhalb der Zustandsübergangsfunktion einer Zelle berücksichtigt werden können. Ein einfaches Zahlenbeispiel verdeutlicht die dabei auftretenden Verhältnisse:

Gegeben sein ein zellulärer Automat als Abbildung eines Gefechtsfeldes mit 10km x 10km Ausdehnung. Jede Zelle des Automaten repräsentiert einen Geländeausschnitt von 25m x 25m, so dass insgesamt 160.000 Zellen existieren. Auf diesem Gefechtsfeld wird zusätzlich ein Waffensystem mit einer maximalen Reichweite von 3km abgebildet. Der zelluläre Automat müsste dann die potentielle Wirkung dieses Waffensystems bei der Bestimmung der Zustandsübergänge von mehr als 45.000 Zellen berücksichtigen.

Auch die geforderte *Parallelität* zellulärer Automaten erscheint bei der hochauflösenden Abbildung moderner Gefechte nicht als sinnvoll, da die Vielzahl der daran beteiligten Waffensystemtypen in sehr unterschiedlichen und lageabhängigen Zeitintervallen ihre Aufklärungs-, Bekämpfungs- und Bewegungsprozesse durchführen. Um diese *individuelle Taktung*¹⁷⁶ der einzelnen Waffensysteme im Gefecht abbilden zu können, wäre es notwendig, extrem kurze Zeitschritte einzuführen und die damit verbundenen Zustandsübergangsberechnungen für alle Zellen des Automaten sehr oft zu wiederholen. Dies stellt einen enorm hohen und oftmals überflüssigen Rechenaufwand dar, der in modernen Modellen durch die Verwendung von Ereignisfolgesimulationen¹⁷⁷ vermieden wird.

Die *Homogenität* als letzte kennzeichnende Eigenschaft zellulärer Automaten, wäre bei der Verwendung in einem hochauflösenden Gefechtssimulationssystem nur dann einzuhalten, wenn jede der Zellen einen sehr umfangreichen und komplexen Regelsatz erhält, der alle erdenklichen Situationen, welche sich aus der Kombination von Gelände- und Waffensystemeigenschaften ergeben können, erfassen kann. Der gewünschte Vorteil zellulärer Automaten ist jedoch die Verwendung kleiner und beherrschbarer Regelsätze, mit denen diese Anforderungen eines hochauflösenden Gefechtssimulationssystems jedoch nicht erfüllt werden könnten.

¹⁷⁵ Als „historische Gefechte“ sollen hier alle Gefechte verstanden werden, welche als Serie klassischer Duellsituationen mit Nahkampfwaffen ausgetragen werden.

¹⁷⁶ Die individuelle Taktung im Gefecht wird u.a. beeinflusst durch die taktische Kadenz des Waffensystems, Niederhaltezeiten und die individuelle Dauer des Zielauffassungs- und Zielauswahlprozesses.

¹⁷⁷ Als Ereignisfolgesimulation bezeichnet man ein Simulationsmodell, welches im Gegensatz zu einer Zeitfolgesimulation nicht in äquidistanten Zeitschritten fortgeschaltet wird, sondern jeweils nur bei Eintritt eines, für das Modell wichtigen Ereignisses.

Zusammenfassend kann man somit feststellen, dass zelluläre Automaten für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen nur eingeschränkt geeignet sind. Die Arbeiten von [Schaub 91a], [Marks, Schlagowsky 96] und [Ilachinski 97] lassen erkennen, dass die in solchen Modellen notwendige hohe Auflösung bei der Abbildung der elementaren Gefechtsobjekte, des Geländes, der Human Factors und der relevanten C⁴I-Prozesse nur durch ein massives Abweichen von der ursprünglichen Theorie zellulärer Automaten zu erreichen wäre, so dass deren inhärente Vorteile nicht mehr genutzt werden könnten. Einzig die Abbildung des Gefechtsfeldes als Gitter quadratischer Geländezellen hat sich als sinnvoll für hochauflösende Gefechtssimulationssystemen erwiesen, da diese Rasterung des Geländes die Abbildung von Bewegungsprozessen und Sichtlinienberechnungen erheblich vereinfacht.¹⁷⁸

Abschließend sollte aber deutlich festgestellt werden, dass die hier geäußerte Kritik an der Verwendungsfähigkeit von zellulären Automaten in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen nicht als generelle Ablehnung dieses Ansatzes zu werten ist. Zelluläre Automaten haben ihre Eignung für die, von [Cobb et al. 93a] oder [Ilachinski 97] beabsichtigten Aufgaben nachgewiesen und sind auch in anderen Anwendungsgebieten innerhalb der Physik oder Biologie – zur Abbildung selbstorganisierenden Verhaltens – mit Erfolg eingesetzt worden.

¹⁷⁸ Eine Beschreibung der Modellierung von Bewegungsprozessen und Sichtlinienberechnungen mit Hilfe eines solchen Geländerrasters enthält etwa [Pötzsch 97].

4.5 Modellierung von Abnutzungsprozessen mit Netzwerken stochastischer Kleingefechte

4.5.1 Beschreibung des Ansatzes

Als letzter Ansatz zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse soll hier die Methode der Verwendung von Netzwerken stochastischer Kleingefechte betrachtet werden. Dieser Ansatz geht ursprünglich auf Arbeiten von Rowland [Rowland 82] sowie Bathe und Manwell [Bathe, Manwell 86] zurück, wurde aber auch in jüngerer Zeit zum Beispiel durch Ancker [Ancker 95] wieder dargestellt. Auf Basis der Ergebnisse militärischer Feldversuche¹⁷⁹ und der Auswertung der Verläufe historischer Schlachten¹⁸⁰ kommen Rowland, Bathe, Manwell und Ancker zu der Erkenntnis, dass größere Gefechtshandlungen komplexe aber separierbare Netzwerke kleiner Feueregefechte darstellen. Ein großes Gefecht kann damit als Summe zusammenhängender aber individueller Kleingefechte betrachtet werden. [Ancker 95] formuliert dies folgendermaßen als Axiom einer von ihm vorgeschlagenen Theorie des Gefechts:

First Axiom for a Theory of Combat: All combat is a hierachical network of fire-fights.

Um die Zusammenhänge zwischen den Kleingefechten, welche gemeinsam ein größeres Gefecht bilden, strukturiert darzustellen und den zeitlich teils sequentiellen, teils parallelen Ablauf dieser Kleingefechte zu verdeutlichen, bildet [Rowland 82] daraufhin größere Gefechte durch gerichtete Netzwerkgraphen ab. Jeder Knoten eines solchen Graphen repräsentiert dabei ein einzelnes Kleingefecht, jede gerichtete Kante den Übergang der überlebenden Kräfte in ein neues Kleingefecht bzw. das Eintreffen frischer Kräfte auf dem Gefechtsfeld (vgl. Abbildung 4.14).

Aufbauend auf dieser Darstellungsform liegt der in [Bathe, Manwell 86] formulierte Ansatz nahe, ein umfangreiches Gefecht zwischen größeren Verbänden durch die Zerlegung in Kleingefechte und die Aufstellung des zugehörigen Netzwerkgraphen zu modellieren. Dieser Modellierungsansatz hat den Vorteil, dass ein derart zerlegtes komplexes Großgefecht durch die Simulation der Kleingefechte zwischen wenigen Einzelsystemen – mit Hilfe relativ einfacher stochastischer Modelle – abgebildet werden kann.

Bei der Umsetzung dieses Ansatzes erwiesen sich folgende Punkte jedoch als problematisch:

1. *Das Gesamtergebnis eines Gefechts hängt von der Struktur des zugrundeliegenden Netzwerks ab:* Durch die Zerlegung eines Gefechts in unterschiedliche Netzwerke von Kleingefechten und Vergleich der mit jedem Netzwerk erzielten Simulationsergebnisse untereinander kommt [Bathe, Manwell 86] zu der Erkenntnis, dass die jeweils gewählte Struktur des Kleingefechtenetzwerks erheblichen Einfluss auf die Gefechtsergebnisse in Form der relativen Gewinnhäufigkeiten und den Umfang der überlebenden Kräfte hat. Dement-

¹⁷⁹ [Rowland 82] bezieht sich auf die Ergebnisse einer Reihe von Feldversuchen (*Exercise CHINESE EYE*), in deren Rahmen die Effektivität britischer Panzerabwehreinheiten gegenüber dem typischen Angriffsverhalten hochmobiler gepanzerter Kräfte des ehemaligen Warschauer Paktes untersucht wurde.

¹⁸⁰ [Ancker 95] nennt als typisches historisches Beispiel für die Aufteilung großer Gefechte in Netzwerke von Kleingruppengefechten die Schlacht von Antietam am 17.09.1862 während des Amerikanischen Bürgerkrieges.

sprechend kommt der gewählten Methode zur Netzwerkgenerierung eine zentrale Bedeutung zu.¹⁸¹

- Die beschreibenden Parameter der Netzwerkstruktur eines Gefechts sind hochgradig szenarabhängig und können teilweise nur ungenau bestimmt werden: Neben netzwerktypischen Parametern, wie etwa der Anzahl der Knoten und Art und Anzahl der verbindenden Kanten, wurden von [Bathe, Manwell 86] das Kräfteverhältnis in den Knoten sowie die mittlere Dauer und die Verteilung der Anfangszeiten der Kleingefechte als beschreibende Parameter untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass diese Parameter in hohem Maße von dem jeweils betrachteten Szenar abhängen. Die explizite Angabe von Funktionen zur Bestimmung der Knoten- oder Kantenzahl bzw. von Verteilungsfunktionen für die Kräfteverhältnisse und Dauer der Kleingefechte in Abhängigkeit von szenarspezifischen Parametern, wie etwa der Dichte der Waffensysteme beider Parteien oder der Gesamtgefechtszeit, gelang jedoch nur teilweise und unzureichend.¹⁸²

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die von [Bathe, Manwell 86] vorgeschlagenen und untersuchten Ansätze zur Generierung von Netzwerken auf eine Vielzahl szenarspezifischer Daten angewiesen sind, welche in ihrem Umfang dem Datenbedarf hochauflösender Einzelschusssimulationen kaum nachstehen

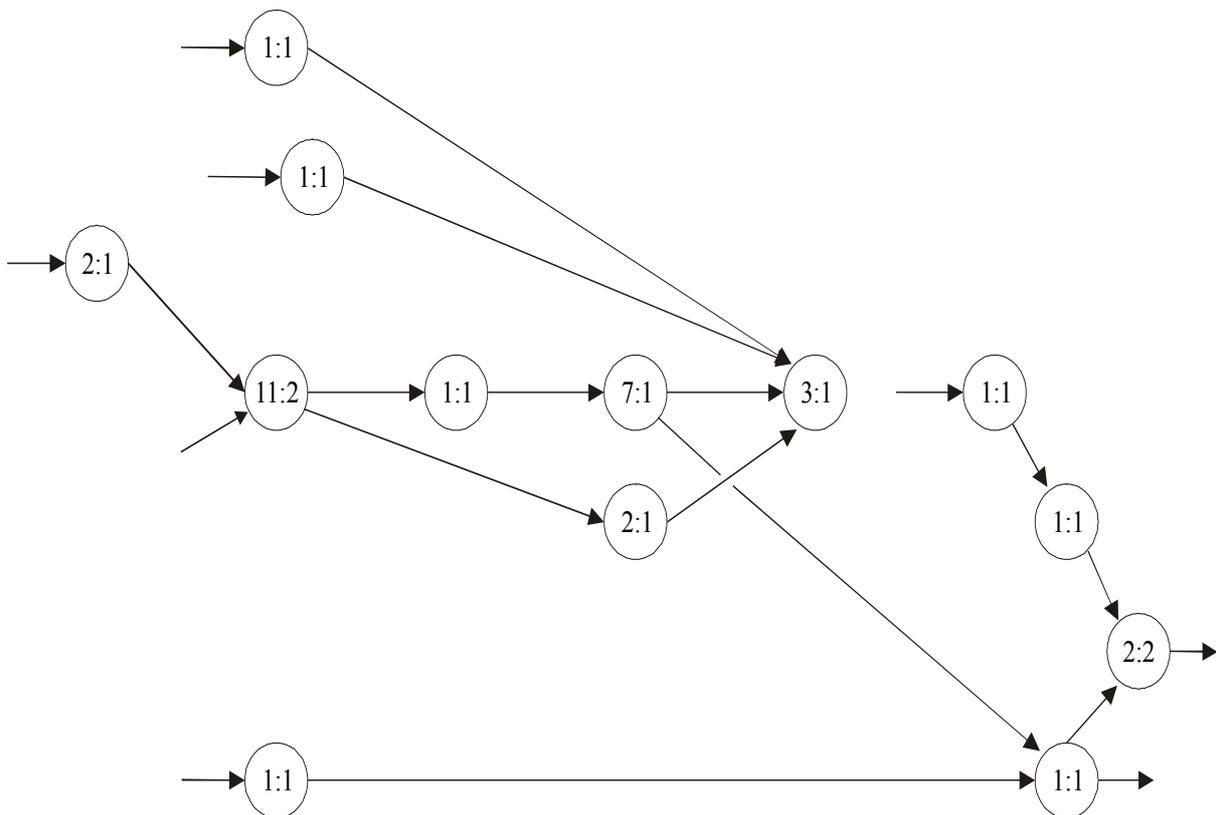


Abbildung 4.14: Darstellung eines Gefechts als Netzwerk einzelner Kleingefechte. (Knoten repräsentieren ein Kleingefecht, Zahlen in den Knoten die jeweiligen Kräfteverhältnisse und gerichtete Kanten Übergänge überlebender Kräfte von einem Kleingefecht in das nächste bzw. das Eintreffen neuer Kräfte) (nach [Rowland 82])

¹⁸¹ vgl. etwa [Schaub 91a], S. 72

¹⁸² vgl. etwa [Schaub 91a], S. 70

4.5.2 Abschließende Bewertung

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Generierung des jeweiligen Netzwerks für den vorgestellten Modellierungsansatz von zentraler Bedeutung ist. [Bathe, Manwell 86] haben aufgezeigt, dass einige Parameter des Netzwerks sich zu diesem Zweck aus allgemeinen Parametern des betrachteten Szenars ermitteln lassen, eine genaue Bestimmung der Netzwerkstruktur jedoch nur auf der Basis einer detaillierten und umfangreichen Szenarbeschreibung möglich ist. Auch die stochastische Natur des Netzwerks und die Tatsache, dass selbst taktische Entscheidungen einzelner Waffensystemkommandanten Einfluss auf die Struktur des Netzwerks haben können, machen deutlich, mit welchen Problemen die Generierung eines solchen Netzwerks für diesen Ansatz verbunden ist.

Es wird somit deutlich, dass die Idee der Abbildung komplexer Gefechte durch Netzwerke stochastischer Kleingefechte der militärisch historischen Realität sicherlich gut entspricht und damit in einer allgemein theoretischen Betrachtung umfangreicher Gefechtshandlungen, wie etwa bei [Ancker 95], von zentraler Bedeutung sein kann.

Für den Einsatz als aggregierte Methode zur Abbildung elementarer Gefechtsprozesse erscheint dieser Modellierungsansatz jedoch ungeeignet. Die Vorteile, die sich daraus ergeben, dass ein hochkomplexes Gefecht – geführt als Kampf der verbundenen Waffen – durch Simulation relativ einfacher Kleingefechte abgebildet werden kann, werden durch den hohen Aufwand, welcher mit der notwendigen Erstellung der jeweiligen Netzwerkstruktur verbunden ist, wieder aufgehoben. Der ursprüngliche Modellierungsaufwand einer Detailsimulation wird durch diese Aggregationsmethode damit nicht wirklich verringert, sondern vielmehr nur in einen anderen Bereich der Modellierung verschoben.

4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich somit für alle gezeigten Ansätze feststellen, dass sie für gewisse Anwendungszwecke mehr oder weniger gut geeignet sind. Als generelle Methode zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse, wie etwa der Bewegungs-, Aufklärungs- und Abnutzungsprozesse innerhalb eines modernen hochauflösenden Gefechtssimulationssystems, müssen sie jedoch sämtlich als weniger gut bis schlecht geeignet bewertet werden.

Die in diesem Rahmen notwendige Detailtreue bei der Abbildung von Gelände- und Waffensystemdaten, des taktischen Verhaltens auf niederen militärischen Führungsebenen sowie weicher Einflussgrößen (Human Factors) und C4I-Prozesse, lässt sich mit Hilfe der vorgestellten Ansätze und ihrer erfolgten Modifikationen nicht oder nur mit enormem Modellentwicklungs-, Kalibrierungs- und Rechenaufwand realisieren.

Dies sowie die ebenfalls festgestellte Szenarabhängigkeit führen dazu, dass umfangreiche Untersuchungen variierender hochauflösender Szenarien mit Hilfe solcher Modelle nur schwer oder unter zumeist nicht vertretbarem Zeitaufwand durchzuführen sind. Das notwendige Datenmaterial für aussagekräftige statistische Untersuchungen steht damit nicht zur Verfügung.

Um alternativ nicht notwendigerweise auf die rechenzeitintensive Methode der Einzelschussimulation zurückgreifen zu müssen, macht deshalb die Entwicklung und Untersuchung eines neuen aggregierten Ansatzes Sinn, welcher bei geringerer Komplexität über die geforderte Abbildungsgüte verfügt.

5 DAS LEITSCHÜTZENPRINZIP ALS ANSATZ ZUR AGGREGIERTEN ABBILDUNG ELEMENTARER GEFECHTSPROZESSE

5.1 Allgemeines

Das vorhergehende Kapitel hat deutlich gemacht, dass existierende Ansätze zumeist nur unzureichend geeignet sind, elementare Gefechtsprozesse in hochauflösenden Simulationssystemen aggregiert abzubilden. Aufgrund dieser Erkenntnis wird im Folgenden das sogenannte Leitschützenprinzip als neuer aggregierter Modellierungsansatz vorgestellt. Das Ziel der Entwicklung dieses Ansatzes war es, innerhalb eines Modells eine möglichst flexible Aggregation zu erlauben, dabei aber bekannte Kritikpunkte bisheriger Aggregationsansätze – vor allem die Notwendigkeit der Bereitstellung umfangreicher aggregierter Eingabedaten sowie die daraus resultierende hohe Szenarabhängigkeit – zu vermeiden.

Im anschließenden Kapitel 6 wird eine beispielhafte Umsetzung des Leitschützenprinzips anhand des Gefechtssimulationsmodells SAMBA¹⁸³ vorgestellt, die Eignung des Ansatzes durch umfangreiche Rechenexperimente nachgewiesen sowie seine Grenzen aufgezeigt.

5.1.1 Der allgemeine Ansatz

Moderne militärische Einsatzgrundsätze¹⁸⁴ sehen vor, dass homogene Gefechtsfahrzeuge auf der militärischen Hierarchieebene des *Zugs* bzw. Infanterieelemente der Ebene *Trupp/Gruppe* die elementaren Gefechtsprozesse *Bewegung*, *Aufklärung* und *Abnutzung* grundsätzlich geschlossen durchführen, um dadurch ihre Wirkungs- und Überlebensfähigkeit zu steigern.

Es liegt nahe, diese Vorgehensweise zur Aggregation in hochauflösenden Gefechtssimulationsmodellen nachzuahmen und zu diesem Zweck homogene Einzelsysteme einer Partei in aggregierten Elementen¹⁸⁵ mit vorgegebener *Mächtigkeit*¹⁸⁶ zusammenzufassen (vgl. Abbildung 5.1). Diese repräsentieren somit im Rahmen der Abbildung *Trupps/Gruppen*¹⁸⁷ bzw. *Züge*¹⁸⁸. Im Gegensatz zu früheren Aggregationsverfahren, die diesen Ansatz ebenfalls verfolgt haben, verwalten aggregierte Elemente im Rahmen des Leitschützenprinzips weiterhin die Informationen über den individuellen Zustand der in ihnen zusammengefassten Einzelsysteme. Diese Informationen umfassen für jedes Waffensystem vor allem Aussagen über die zeitabhängige Schieß- und Erleideraktivität, welche sich unter anderem aus Munitionsvorrat und Deckungsgrad ableiten lassen, die Bewegungsfähigkeit sowie die Aussage darüber, ob ein Einzelsystem aktuell niedergehalten ist. Mit Hilfe dieser Informationen ist es möglich, Aktionen und Interaktionen zwischen aggregierten Gefechtselementen mit Hilfe von entsprechend modifizierten Algorithmen hochauflösender nicht aggregierter Simulationsmodelle abzubilden.

¹⁸³ Für eine ausführliche Beschreibung des Modells SAMBA vgl. Kapitel 6

¹⁸⁴ vgl. etwa [AnwFE 222/100] Nr. 212 und Nr. 252

¹⁸⁵ Im Weiteren soll zur sprachlichen Abgrenzung der Begriff „Einzelsystem“ ein Objekt (Gefechtsfahrzeug oder Infanterist) bezeichnen, welches im Rahmen des Leitschützenprinzips mit anderen homogenen Systemen in einem aggregierten Gefechtselement zusammengefasst wird. Der Begriff „(Gefechts-)Element“ beschreibt dagegen grundsätzlich ein aggregiertes Objekt, welches für die nachfolgende Abbildung der Gefechtsprozesse jedoch als elementar angesehen wird.

¹⁸⁶ Hierbei soll unter *Mächtigkeit* in Analogie zum mathematischen Sprachgebrauch die Anzahl homogener Einzelsysteme verstanden werden, welche in einem solchen aggregierten Element gruppiert werden.

¹⁸⁷ Bei Infanteriewaffensystemen, d.h. Schützen, Maschinengewehre, Panzerfäuste oder ähnlichem.

¹⁸⁸ Bei Gefechtsfahrzeugwaffensystemen, wie etwa Kampfpanzern, Schützenpanzern oder ähnlichem.

Neben der Zusammenfassung von Einzelsystemen in aggregierten Gefechtselementen betrifft die Aggregation im Rahmen des Leitschützenprinzips vor allem zwei weitere Modellierungsaspekte:

- Das Leitschützenprinzip *beschränkt die Fähigkeit zur Aktion bzw. Interaktion auf aggregierte Gefechtselemente*, d.h. alle aktiven Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes führen die elementaren Prozesse Bewegung, Aufklärung und Abnutzung stets geschlossen und somit zeitparallel durch.¹⁸⁹
- Für die Modellierung des Aufklärungsprozesses *notwendige Sichtlinienbestimmungen werden nur noch zwischen fiktiven Positionen der aggregierten Gefechtselemente vorgenommen* und nicht zwischen denen der individuellen Einzelsysteme. Die dazu notwendigen fiktiven Koordinatenpositionen der aggregierten Gefechtselemente können etwa durch Schwerpunktbildung aus den Positionen der jeweiligen Einzelsysteme oder alternativ durch die Verwendung geeigneter Dislozierungsschablonen ermittelt werden (vgl. Kapitel 5.1.4.2).

Die Aggregation im Rahmen des Leitschützenprinzips reduziert dadurch einerseits die mögliche Zahl gleichzeitig auftretender Aktionen bzw. Interaktionen, da diese nur noch durch aggregierte Elemente ausgeführt werden können. Daraus resultiert eine deutlich geringere Zahl von Ereignissen, welche durch das Simulationssystem zu verwalten sind und somit ein – gegenüber einer Simulation auf Einzelsystemebene – geringerer Rechenaufwand. Andererseits wird gleichzeitig die ursprünglich hohe Zahl der für die Sichtlinienbestimmungen notwendigen Geländeschnitte reduziert, welche bei einer für hochauflösende Gefechtssimulationen als angemessen geltenden Geländeabbildung zumeist sehr aufwendig sind und deshalb wesentlich zum Gesamtzeitbedarf eines Simulationslaufes beitragen.

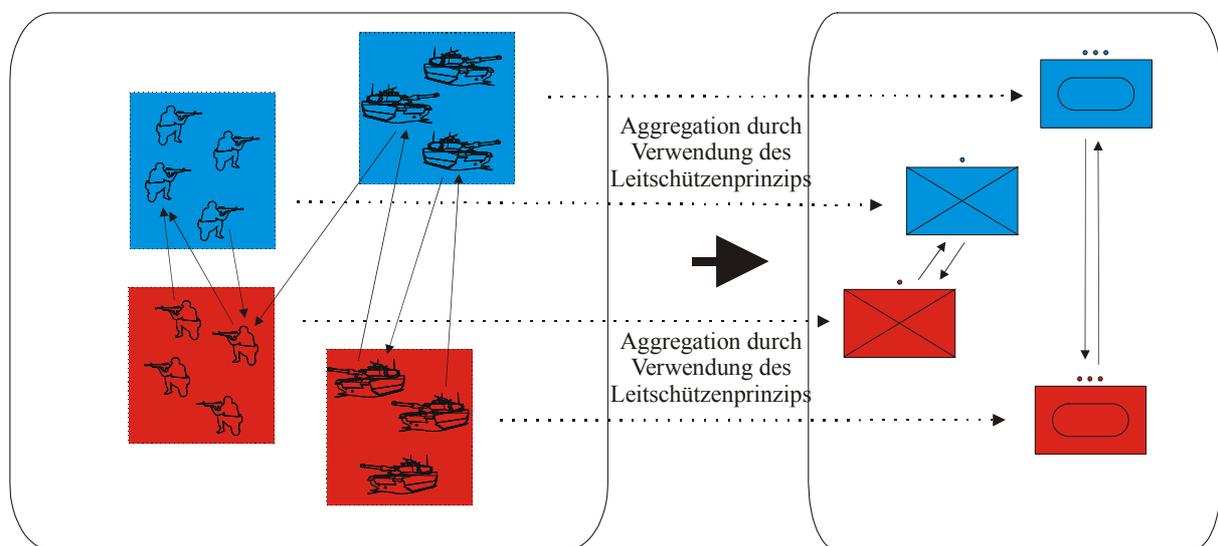


Abbildung 5.1: Aggregation durch Verwendung des Leitschützenprinzips (Homogene Waffensysteme (KPz bzw. Schützen) werden zu aggregierten Elementen zusammengefasst.)

¹⁸⁹ Insbesondere bedeutet dies, dass sämtliche schießaktiven Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselements stets zum gleichen Zeitpunkt alle entdeckten erleideraktiven Systeme eines aufgeklärten feindlichen Gefechtselements bekämpfen. Eine Aufteilung der verfügbaren Feuerkraft eines Elements auf mehrere feindliche Elemente ist nicht vorgesehen, wohl aber können unterschiedliche gegnerische aggregierte Gefechtselemente nacheinander bekämpft werden.

5.1.2 Bildung der aggregierten Elemente

Betrachtet wird eine Partei *Blau*, welche über s unterschiedliche Einzelsystemtypen mit insgesamt N_B Systemen verfügt und eine Partei *Rot*, welche über u unterschiedliche Einzelsystemtypen mit insgesamt N_R Systemen verfügt. Das Leitschützenprinzip fasst diese N_B / N_R Einzelsysteme in \bar{N}_B respektive \bar{N}_R aggregierten Elementen zusammen, welche t / v unterschiedlichen aggregierten Elementtypen angehören. Jeweils \bar{a}_{ji} bzw. \bar{b}_{lk} homogene Einzelsysteme eines Typs i / k bilden dazu ein Element des aggregierten Typs j / l . Die t / v aggregierten Elementtypen unterscheiden sich somit durch Anzahl und Typ der jeweils in ihnen zusammengefassten homogenen Einzelsysteme beider Parteien. Mit:

- N_B = Gesamtzahl der Einzelsysteme aller Typen der Partei *Blau*
- N_R = Gesamtzahl der Einzelsysteme aller Typen der Partei *Rot*
- s = Anzahl unterschiedlicher Einzelsystemtypen der Partei *Blau*
- u = Anzahl unterschiedlicher Einzelsystemtypen der Partei *Rot*
- i = Index der Einzelsystemtypen der Partei *Blau* ($1 \leq i \leq s$)
- k = Index der Einzelsystemtypen der Partei *Rot* ($1 \leq k \leq u$)
- a_i = Anzahl der Systeme vom Typ i der Partei *Blau*
- b_k = Anzahl der Systeme vom Typ k der Partei *Rot*
- \bar{N}_B = Gesamtzahl aggregierter Elemente der Partei *Blau*
- \bar{N}_R = Gesamtzahl aggregierter Elemente der Partei *Rot*
- t = Anzahl unterschiedlicher Typen aggregierter Elemente der Partei *Blau*
($s \leq t \leq N_B$)
- v = Anzahl unterschiedlicher Typen aggregierter Elemente der Partei *Rot*
($u \leq v \leq N_R$)
- j = Index der unterschiedlichen Typen aggregierter Elemente der Partei *Blau*
($1 \leq j \leq t$)
- l = Index der unterschiedlichen Typen aggregierter Elemente der Partei *Rot*
($1 \leq l \leq v$)
- \bar{a}_{ji} = Mächtigkeit des aggregierten Elementtyps j , d.h. Anzahl Einzelsysteme des Typs i , die in einem aggregierten Element des Typs j der Partei *Blau* zusammengefasst werden
- \bar{b}_{lk} = Mächtigkeit des aggregierten Elementtyps l , d.h. Anzahl Einzelsysteme des Typs k , die in einem aggregierten Element des Typs l der Partei *Rot* zusammengefasst werden
- \bar{x}_j = Anzahl aggregierter Elemente des Typs j der Partei *Blau*
- \bar{y}_l = Anzahl aggregierter Elemente des Typs l der Partei *Blau*

gilt somit

$$\begin{aligned}
 N_B &= \sum_{i=1}^s a_i \\
 N_R &= \sum_{k=1}^u b_k
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

bzw.

$$\begin{aligned}
 N_B &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \bar{a}_{ji} \\
 N_R &= \sum_{k=1}^u \sum_{l=1}^v \bar{b}_{lk}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

da

$$\begin{aligned}
 a_i &= \sum_{j=1}^t \bar{a}_{ji} \quad \forall i : 1 \leq i \leq s \\
 b_k &= \sum_{l=1}^v \bar{b}_{lk} \quad \forall k : 1 \leq k \leq u
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

Ferner gilt:

$$\begin{aligned}
 \bar{N}_B &= \sum_{j=1}^t \bar{x}_j \\
 \bar{N}_R &= \sum_{l=1}^v \bar{y}_l
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Weiterhin kann gelten:

$$\begin{aligned}
 \exists i_1, i_2, j_1, j_2 : i_1 = i_2 \wedge j_1 \neq j_2 \wedge \bar{a}_{j_1 i_1} \neq \bar{a}_{j_2 i_2} \\
 \exists k_1, k_2, l_1, l_2 : k_1 = k_2 \wedge l_1 \neq l_2 \wedge \bar{b}_{l_1 k_1} \neq \bar{b}_{l_2 k_2}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

d.h. es ist möglich, zu einem *blauen/roten* Einzelsystemtyp i/k mehrere aggregierte Typen j/l unterschiedlicher Mächtigkeit zu definieren, auf welche die Gesamtzahl der a_i / b_k Einzelsysteme verteilt werden. Auf die simulierte Realität übertragen bedeutet dies, dass das Leitschützenprinzip die Möglichkeit einer Partei *Blau/Rot* abbildet, einen Einzelsystemtyp (z.B. KPz Leopard 2) in Teileinheiten der selben militärischen Hierarchieebene aber unterschiedlicher Größe (Züge mit 3 bzw. 4 Einzelfahrzeugen) zusammenzufassen.

Jedes der \bar{N}_B bzw. \bar{N}_R aggregierten Elemente verfügt über Vektoren, welche über den individuellen Schadenszustand¹⁹⁰, die Schieß-/Erleideraktivität, den Deckungsgrad und Niederhaltungszustand jedes der in ihm zusammengefassten Einzelsysteme Auskunft gibt. Die genaue Art und Zahl der gespeicherten Zustandsvektoren kann selbstverständlich von Modell zu Modell unterschiedlich sein und hängt in hohem Maße von den Algorithmen ab, welche zur Abbildung der Gefechtsprozesse genutzt werden.

¹⁹⁰ Unter Schadenszustand soll hier verstanden werden, ob ein einzelnes Fahrzeug unbeschädigt, bewegungsunfähig, kampfunfähig, etc. ist.

5.1.3 Zeitliche Taktung der aggregierten Elemente

Einzelfahrzeuge bzw. –schützen führen elementare Gefechtsprozesse nur noch als Teil des aggregierten Elements und damit zu den Zeitpunkten durch, welche durch die zeitliche Taktung des Leitschützensystems¹⁹¹ – eines repräsentativen Systems dieses Einzelsystemtyps – für das gesamte aggregierte Element vorgegeben werden. Der individuelle zeitabhängige Zustand der einzelnen Systeme eines aggregierten Elements bezüglich Schieß- und Erleideraktivität sowie Niederhaltung wird zwar weiterhin abgebildet, ist jedoch nicht mehr für den Zeitpunkt der Durchführung einer Aktion durch das Element ausschlaggebend. Im Rahmen des Leitschützenprinzips wird vielmehr ermittelt, welche Systeme eines aggregierten Elements aufgrund ihrer Taktung und ihres Zustands überhaupt fähig sind, an der aktiven Durchführung von Gefechtsprozessen teilzunehmen (vgl. Abbildung 5.2). Ist ein Waffensystem dazu nicht in der Lage, so muss es mit der Durchführung dieses Gefechtsprozesses bis zum nächsten durch die Taktung des Leitschützensystems vorgegebenen Zeitpunkt warten bzw. wird aus dem aggregierten Element entfernt, wenn der Charakter des jeweiligen Prozesses dies erfordert¹⁹². Konkret bedeutet dies etwa, dass jeweils nur die *schießaktiven* Einzelsysteme eines aggregierten Elements an einem Abnutzungsprozess bzw. die *bewegungsfähigen* Systeme an einer Bewegung des Elements teilnehmen können.

Bei dem die Taktung bestimmenden Leitschützen eines aggregierten Elements handelt es sich um ein Pseudo-System, welches über die gleichen Eigenschaften verfügt, wie die in dem aggregierten Element zusammengefassten Waffensysteme. Das Leitschützensystem ist kein real existierendes Einzelsystem des aggregierten Elementes, sondern vielmehr ein prototypisch angenommenes System. Es dient einzig zur Vorgabe der zeitlichen Taktung der elementaren Gefechtsprozesse, indem es auf Basis konstanter Daten wie Waffenlade- und Richtzeiten, Aufklärungsdauer oder (geländeabhängiger) Maximalgeschwindigkeit die Dauer der jeweiligen Prozesse ermittelt. Das prototypische Leitschützensystem unterliegt insbesondere nicht den abgebildeten Abnutzungsprozessen, so dass es für die gesamte Lebensdauer eines aggregierten Elements genutzt werden kann.

¹⁹¹ Hieraus erklärt sich der Name des Ansatzes.

¹⁹² Das Entfernen eines Einzelsystems aus einem aggregierten Element kann etwa dann notwendig werden, wenn ein Element eine Bewegung durchführen will und einzelne Systeme aufgrund von Gefechtsschäden nicht mehr bewegungsfähig sind. Wie mit den entfernten Einzelsystemen weiter verfahren wird, ist abhängig von der gewählten Modellierung des jeweiligen Gefechtssimulationssystems. Es wäre jedoch denkbar, solche Systeme als Ausfälle zu werten oder alternativ dynamisch neue aggregierte Elemente zu bilden, welche die bewegungsunfähigen Systeme aufnehmen, so dass diese zumindest noch in der Lage sind, ihre Sensoren und Waffen einzusetzen.

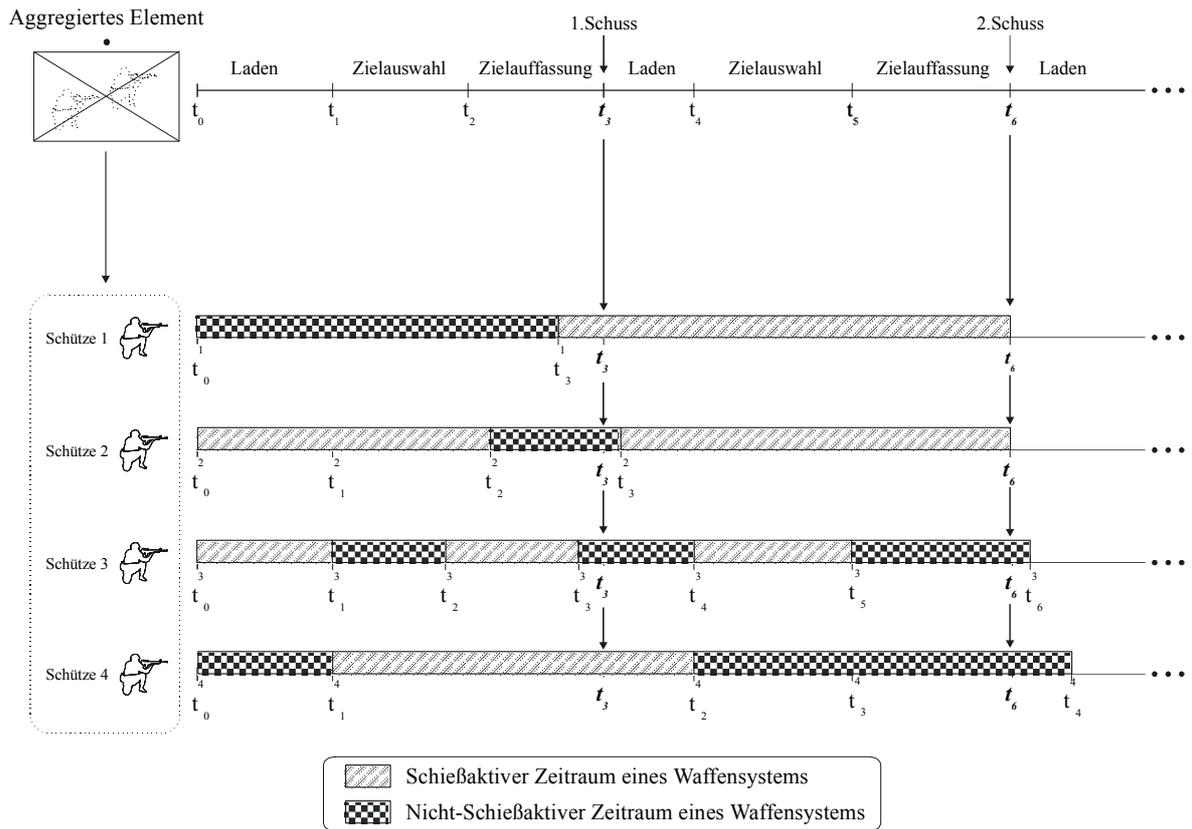


Abbildung 5.2: Beziehung zwischen der Taktung des aggregierten Gefechts-elementes (vorgegeben durch Leitschützen) und individueller Taktung der Einzelsysteme des Elements (Schützen 1-4)

5.1.4 Abbildung elementarer Gefechtsprozesse

5.1.4.1 Grundlegende Annahmen

Im Rahmen des Leitschützenprinzips kann zur Abbildung der elementaren Gefechtsprozesse Bewegung, Aufklärung und Abnutzung auf modifizierte Algorithmen hochauflösender Einzelfahrzeugmodelle zurückgegriffen werden. Diese haben den Vorteil auf nicht aggregierten Eingabedaten zu operieren. Die durch Schaub [Schaub 91a] aufgezeigten Probleme bei der Ermittlung aggregierter Eingabeparameter (vgl. Kapitel 4.2.4), wie sie zum Beispiel in Lancastermodellen oder Markov-Ansätzen verwendet werden, können somit vermieden werden. Eine Modifikation der Algorithmen wird gegenüber Einzelfahrzeugmodellen notwendig, da die jeweiligen Gefechtsprozesse nun von aggregierten Gefechtselementen durchgeführt werden, welche über eine von eins verschiedene Mächtigkeit verfügen können. Da es jedoch möglich ist, dass Elemente verschiedener Mächtigkeit in einem Szenar existieren und aggregierte Element ihre Mächtigkeit im Verlauf eines Gefechts etwa durch Ausfälle dynamisch ändern, müssen die modifizierten Algorithmen in der Lage sein, diese in gewissen Grenzen¹⁹³ variierenden Mächtigkeiten sinnvoll zu erfassen.

Im Folgenden werden grundlegende Probleme und Annahmen für die Prozesse Aufklärung, Abnutzung und Bewegung vorgestellt, welche sich durch die Verwendung des Leitschützenprinzips zwangsläufig ergeben. Eine beispielhafte Lösung und algorithmische Umsetzung zu jedem der vorgestellten Problemkreise findet sich dann in der anschließenden Beschreibung des Modells SAMBA.¹⁹⁴

5.1.4.2 Zielaufklärung beim Leitschützenprinzip

Wie oben bereits erwähnt, werden im Rahmen des Leitschützenprinzips Sichtlinienbestimmungen nur noch zwischen aggregierten Gefechtselementen und nicht zwischen den jeweils in ihnen zusammengefassten Einzelsystemen durchgeführt, um somit die Zahl der benötigten Geländeschnitte und die daraus resultierende die Rechenzeit zu reduzieren. Die dabei verwendeten fiktiven Positionen können z.B. mit einem der folgenden Ansätzen ermittelt werden:

- Berechnung des *Koordinatenschwerpunkts*: Dieser Ansatz geht davon aus, dass die individuellen Koordinatenpositionen der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes gegeben sind und im Falle einer Bewegung des Gefechtselementes konsistent fortgeschrieben werden. Sobald notwendig, kann dann die fiktive Position des aggregierten Gefechtselementes als Koordinatenschwerpunkt (\bar{x}, \bar{y}) der Positionen der jeweiligen Einzelsysteme (vgl. Abbildung 5.3) berechnet werden gemäß:

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\sum_{e=1}^n x_e / n, \sum_{e=1}^n y_e / n \right) \quad (5.6)$$

wobei gilt:

- n = Anzahl der nicht ausgefallenen Einzelsysteme des betrachteten Gefechtselementes
- e = Laufindex der Einzelsysteme des betrachteten Gefechtselementes

¹⁹³ vgl. Kapitel 5.3, S. 120

¹⁹⁴ vgl. Kapitel 6, S. 129ff

x_e = x-Komponente der Koordinatenposition des *e-ten* Einzelsystems

y_e = y-Komponente der Koordinatenposition des *e-ten* Einzelsystems

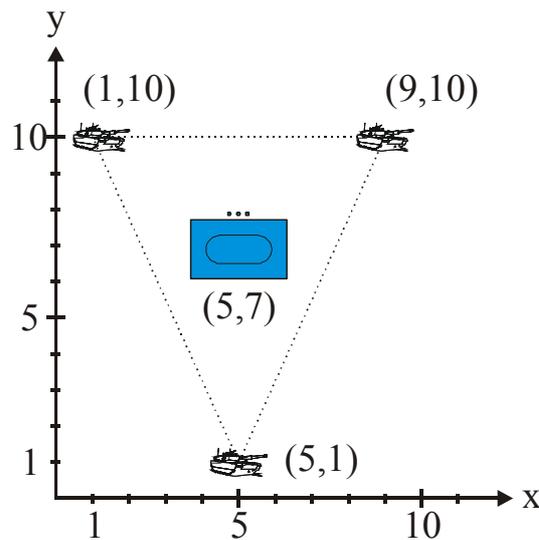


Abbildung 5.3: Ermittlung der fiktiven Position eines aggregierten Gefechtselementes durch Schwerpunktberechnung

- Verwendung von *Dislozierungsschablonen*: Im Gegensatz zu dem ersten vorgestellten Ansatz wird hierbei davon ausgegangen, dass die individuellen Koordinatenpositionen der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes nicht direkt gegeben sind. Vielmehr wird im Rahmen dieser Methode die fiktive Koordinatenposition des angenommenen prototypischen Leitschützelementes vorgegeben und die individuellen Positionen der Einzelsysteme mit Hilfe ebenfalls vorgegebener Dislozierungsschablonen (vgl. Abbildung 5.4) daraus abgeleitet. Entsprechend der Mächtigkeit des jeweiligen Gefechtselementes bestehen die Dislozierungsschablonen dazu etwa aus einer vorgegeben Menge von Vektoren, welche die relative Lage der jeweiligen Einzelsysteme zu der gegebenen fiktiven Koordinatenposition des Leitschützelementes in Abhängigkeit von der momentanen Bewegungsrichtung des Gefechtselementes beschreiben. Die Dislozierungsschablonen repräsentieren somit die aus militärischen Führungsvorschriften¹⁹⁵ bekannten Formen der Entfaltung von Teileinheiten und Einheiten. Ein besonderes Augenmerk muss bei der Verwendung dieses Ansatzes auf die Tatsache gelegt werden, dass aggregierte Gefechtselemente ihre ursprüngliche Mächtigkeit durch Ausfall von Einzelsystemen im Lauf des Gefechts verändern können, so dass gegebenenfalls nur Teile der jeweiligen Dislozierungsschablone Verwendung finden. Zu diesem Zweck kann es z.B. sinnvoll sein, die gegebenen Vektoren einer Schablone mit einer Reihenfolge zu versehen, in welcher sie für die Bestimmung der Position von Einzelsystemen eines aggregierten Gefechtselementes genutzt werden. Davon unbelassen besteht natürlich die Möglichkeit eines Benutzers oder Führungsautomaten, die Dislozierungsschablone eines aggregierten Gefechtselementes während eines Simulationslaufes entsprechend des Geländes bzw. der Phase eines Gefechts zu verändern.

¹⁹⁵ vgl. etwa [AnwFE 222/100]

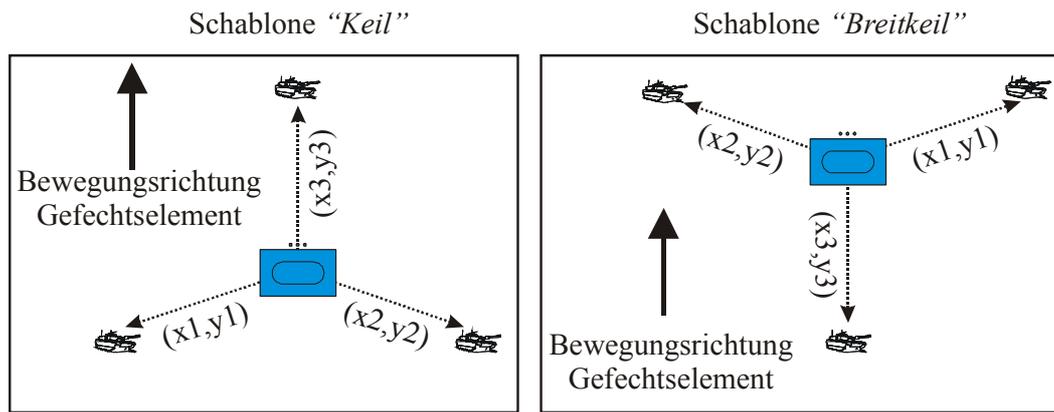


Abbildung 5.4: Dislozierungsschablonen für aggregierte Gefechtselemente mit maximal drei Einzelsystemen

Der für die Prüfung auf Existenz einer Sichtverbindung zwischen zwei aggregierten Gefechtselementen notwendige Geländeschnitt findet zwischen den jeweils ermittelten bzw. vorgegeben fiktiven Positionen der angenommenen Leitschützelemente in dem abgebildeten Gelände statt. In Abhängigkeit von diesem Geländeschnitt wird dann vereinfachend angenommen, dass eine Sichtverbindung zwischen allen bzw. keinem der Einzelsysteme der geprüften Gefechtselemente besteht.¹⁹⁶

Existiert eine Sichtverbindung, muss nun im Rahmen der Modellierung des Aufklärungsprozesses weiterhin bestimmt werden, welche Einzelsysteme eines Gefechtselementes durch die Sensoren der aufklärenden Einzelsysteme eines feindlichen Gefechtselementes entdeckt werden bzw. übersehen werden. Dazu sind z.B. die folgenden grundlegenden Ansätze (vgl. Abbildung 5.5) denkbar:

- *Vollständig individuelle Entdeckung:* Für jedes aufklärungsaktive Einzelsystem eines Gefechtselementes wird individuell bestimmt, welche Einzelsysteme eines feindlichen Gefechtselementes es entdeckt hat. Ein Austausch dieser Informationen zwischen den individuellen Einzelsystemen findet nicht statt, so dass das Aufklärungsergebnis jedes Einzelsystems von denen der restlichen Einzelsysteme des Gefechtselementes divergieren kann. Dies hat zur Folge, dass für ein einzelnes Gefechtselement kein absolut gültiges einheitliches Aufklärungsergebnis existiert, welches etwa als Grundlage für einen anschließenden Zielauswahlprozess verwendet werden könnte. Vielmehr wäre ein Modell bei der Abbildung solcher Prozess dazu gezwungen, die individuellen Aufklärungsergebnisse aller Einzelsysteme des Gefechtselementes geeignet zu berücksichtigen. In der Realität eines Gefechts würde diesem Ansatz eine Situation entsprechen, in der keinerlei Informationsaustausch über aufgeklärte Ziele zwischen den Elementen einer Kampfgemeinschaft stattfindet. In den meisten Armeen wird jedoch explizit versucht, diese Situation durch gezielte Ausbildung bzw. entsprechende technische Ausrüstung¹⁹⁷ zu vermeiden und damit die Wirkungsfähigkeit etwa einer Infanteriegruppe oder eines Panzerzuges zu erhöhen.

¹⁹⁶ Die individuell unterschiedlichen Sichtbedingungen – im Sinne der Existenz einer Sichtverbindung – zwischen den Einzelsystemen könnten dabei – je nach Geländerauhigkeit – im Rahmen der sich anschließenden Simulation des Entdeckungsprozesses berücksichtigt werden.

¹⁹⁷ Armeen (z.B. die deutsche Bundeswehr) bilden ihre Soldaten zumeist dazu aus, innerhalb einer Kampfgemeinschaft, wie etwa der Infanteriegruppe, Informationen über aufgeklärte Ziele ständig auszutauschen, um damit auch andere Mitglieder der Gruppe zu deren Bekämpfung zu befähigen. Moderne Führungsinformationssysteme (z.B. das Tank Command and Control Systems (TCCS) der Exportversion des Kampfpanzer Leopard 2A5) ermöglichen dies neuerdings auch für die Besatzungen gepanzerter Fahrzeuge (z.B. eines Panzerzuges) auf nonverbalen Wege.

- Einseitig individuelle Entdeckung:* Bei diesem Ansatz sind zwei Ausprägungen denkbar. Zum Einen ist es möglich, für jedes aufklärungsaktive Einzelsystem eines Gefechtselementes individuell zu bestimmen, ob es die Einzelsysteme eines feindlichen Gefechtselementes entdeckt. Bei den zu entdeckenden Einzelsystemen wird dabei keine Unterscheidung getroffen, so dass ein aufklärendes Gefechtselement jeweils alle bzw. kein Einzelsystem des feindlichen Gefechtselementes entdeckt. Innerhalb des aufklärenden Gefechtselementes liegt dabei wiederum kein einheitliches Aufklärungsergebnis vor, da jedes seiner Einzelsysteme über ein individuelles Aufklärungsergebnis verfügen kann. Dieser Ansatz lässt sich etwa dadurch motivieren, dass man von der Annahme ausgeht, dass in der Realität die Entdeckung eines feindlichen Einzelsystems einen Rückschluss auf das Vorhandensein der weiteren Einzelsysteme einer Kampfgemeinschaft zulässt und somit gleichsam zu deren Entdeckung führt. Dies setzt jedoch auf Seiten des aufklärenden Einzelsystems ein hohes Maß an Information über die Gliederung der feindlichen Kampfgemeinschaften voraus, welches zumeist nur selten gegeben sein dürfte. Gleichzeitig wird bei dieser Ausprägung erneut davon ausgegangen, dass ein Informationsaustausch zwischen den aufklärenden Einzelsystemen einer Kampfgemeinschaft nicht stattfindet, was jedoch aus den oben genannten Gründen ebenfalls zumindest fraglich erscheint. Die zweite denkbare Ausprägung des Ansatzes der *Einseitig individuellen Entdeckung* hätte zur Folge, dass für jedes individuelle Einzelsystem eines Gefechtselementes separat entschieden wird, ob es von allen aufklärenden Einzelsystemen eines feindlichen Gefechtselementes entdeckt oder übersehen wird. Auf Seiten des aufklärenden Gefechtselementes würde dadurch ein einheitliches Aufklärungsergebnis vorliegen, welches in einem Zielauswahlprozess genutzt werden kann. Diese Ausprägung repräsentiert die bereits beschriebene Situation einer Kampfgemeinschaft, welche auf verbalem bzw. technischem Weg Informationen über aufgeklärte Ziele austauscht. Das Vorhandensein von genauen Informationen über die Gliederung feindlicher Kampfgemeinschaften wird hierbei nicht angenommen.
- Kollektive Entdeckung:* Im Rahmen dieses Ansatzes wird nur entschieden, ob ein aggregiertes Gefechtselement irgendein anderes entdeckt. Ist dies der Fall, so gelten sämtliche Einzelsysteme des feindlichen Gefechtselementes durch alle Einzelsysteme des aufklärenden als entdeckt. Von den hier vorgestellten Ansätzen stellt dieser den modellierungstechnisch einfachsten jedoch vermutlich auch ungenauesten dar. Eine mögliche Interpretation dieses Ansatzes in der Realität eines Gefechts ergibt sich aus den oben bereits beschriebenen.

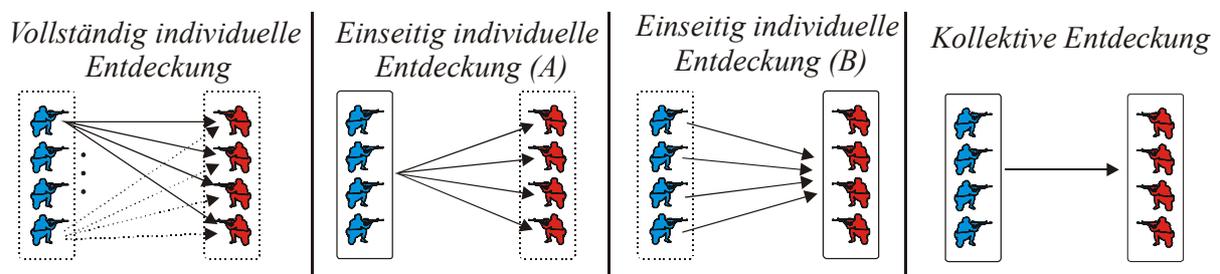


Abbildung 5.5: Ansätze zur Entdeckung (Pfeile symbolisieren individuelle Überprüfung einer Entdeckung)

5.1.4.3 Aktive Abnutzung beim Leitschützenprinzip

Als grundlegende Annahme im Rahmen der Modellierung der Abnutzung im Leitschützenprinzip gilt das **Prinzip der geschlossenen Bekämpfung**:

Alle schießaktiven¹⁹⁸ Einzelsysteme eines Gefechtselementes bekämpfen im Rahmen eines Bekämpfungsvorganges stets geschlossen die entdeckten erleideraktiven¹⁹⁹ Einzelsysteme eines feindlichen Gefechtselementes. Eine Aufteilung der Feuerkraft eines Gefechtselementes auf verschiedene feindliche Gefechtselemente innerhalb eines Bekämpfungsvorganges findet nicht statt.

Bei der Modellierung der aktiven Abnutzung im Rahmen des Leitschützenprinzips lassen sich für Treffer- und Schadensermittlung grundsätzlich Algorithmen hochauflösender Einzelschussimulationssysteme verwenden, da die hierbei verwendenden Daten und Parameter, wie etwa Waffenstreuung, Waffenwirkwahrscheinlichkeit oder Panzerungsgrad des Ziels, als Daten der Einzelsysteme bzw. Gefechtselemente stets unabhängig vom jeweils gewählten Aggregationsgrad im Modell vorhanden sind. Anpassungsbedarf ergibt sich aber aus der Tatsache, dass es sich sowohl bei dem Verursacher als auch bei dem Erleider einer Abnutzung um aggregierte Gefechtselemente, d.h. Gruppen homogener Einzelsysteme, handelt. Dies muss in der Modellierung der Zielauswahl und insbesondere der Verteilung der feuernden Einzelsysteme des Verursacherelementes auf die erleideraktiven Einzelsysteme des Erleideres berücksichtigt werden.

Im Rahmen der **Zielauswahl** muss das Verursacherelement aus der Menge der durch ihn aufgeklärten feindlichen Gefechtselemente ein Ziel für die anschließende Bekämpfung auswählen. Die hierbei denkbaren Ansätze umfassen:

- *Zufällige Zielauswahl*: Aus der Menge der aufgeklärten feindlichen Gefechtselemente wird mittels eines vorgegebenen Zufallsprozesses ein Element als Ziel ausgewählt. Eventuell bei dem Verursacher vorhandene Informationen über Mächtigkeit, Entfernung oder Bewaffnung der jeweiligen feindlichen Gefechtselemente finden dabei augenscheinlich keine Beachtung.
- *Geometrisch begründete Zielauswahl*: Denkbar wäre hierbei etwa stets das in der kürzesten Entfernung befindliche feindliche Gefechtselement auszuwählen oder eine Bekämpfung z.B. „von links nach rechts“ (vgl. Abbildung 5.6) vorzunehmen. Ermöglichen diese Kriterien – etwa bei Vorliegen gleicher Entfernungen – keine eindeutige Zielauswahl, so kann anschließend auf eine zufällige Auswahl aus der Menge gleichbewerteter Elemente zurück gegriffen werden. Vorhandene Informationen, welche über die Position und sich daraus ableitende geometrische Verhältnisse der feindlichen Gefechtselemente hinausgehen, werden dabei ebenfalls nicht berücksichtigt.
- *Informationsbasierte Zielauswahl*: Zu dieser Kategorie sollen hier all diejenigen Ansätze gerechnet werden, welche für die Zielauswahl vorhandene Informationen über die aufgeklärten feindlichen Gefechtselemente nutzen, die über die Koordinatenposition hinausgehen. Solche Informationen können vor allem den Typ und davon abgeleitet das Potential

¹⁹⁸ Ob ein Einzelsystem des Verursachers schießaktiv oder nicht schießaktiv ist, kann z.B. anhand des Munitionsvorrates oder des Niederhaltzustandes des jeweiligen Einzelsystems ermittelt werden.

¹⁹⁹ Ob ein Einzelsystem eines Erleiders gegenüber der jeweiligen Feuerart verwundbar, d.h. erleideraktiv ist oder nicht, lässt sich z.B. anhand des Deckungsgrades bzw. des Niederhaltzustandes des jeweiligen Einzelsystems ermitteln.

der in dem feindlichen Gefechtselement zusammengefassten Einzelsysteme, Geschwindigkeit und vermutete oder bekannte Bewegungsrichtung sowie spezifisch im Leitschützenprinzip die Mächtigkeit des jeweiligen Gefechtselementes umfassen. Zusammen mit Informationen über Typ, Position und Zustand des Verursachergefechtselementes kann anhand dieser Daten etwa eine Bekämpfungsreihenfolge ermittelt werden, die festlegt, welches der Gefechtselemente mit dem größtmöglichen Nutzen als nächstes bekämpft und somit als Ziel ausgewählt werden soll. Die Bestimmung des Nutzens, welches ein Verursachergefechtselement der Bekämpfung eines feindlichen Gefechtselementes zurechnet, kann dabei zum Beispiel mit Hilfe von Methoden der multidimensionalen Nutzwertanalyse geschehen.²⁰⁰ Welche Informationen dabei im Einzelnen Berücksichtigung finden und wie sie im Rahmen einer Nutzwertanalyse genau bewertet werden, kann selbstverständlich von den taktischen Ansätzen der am Gefecht beteiligten Parteien abhängen, welche im Modell nachgebildet werden sollen. Insbesondere kann diese Vorgehensweise und Bewertung im Verlauf eines Simulationslaufes Variationen erfahren, da innerhalb verschiedener Phasen eines Gefechtes die Zielauswahl nach unterschiedlichen Regeln und Kriterien erfolgen kann.²⁰¹

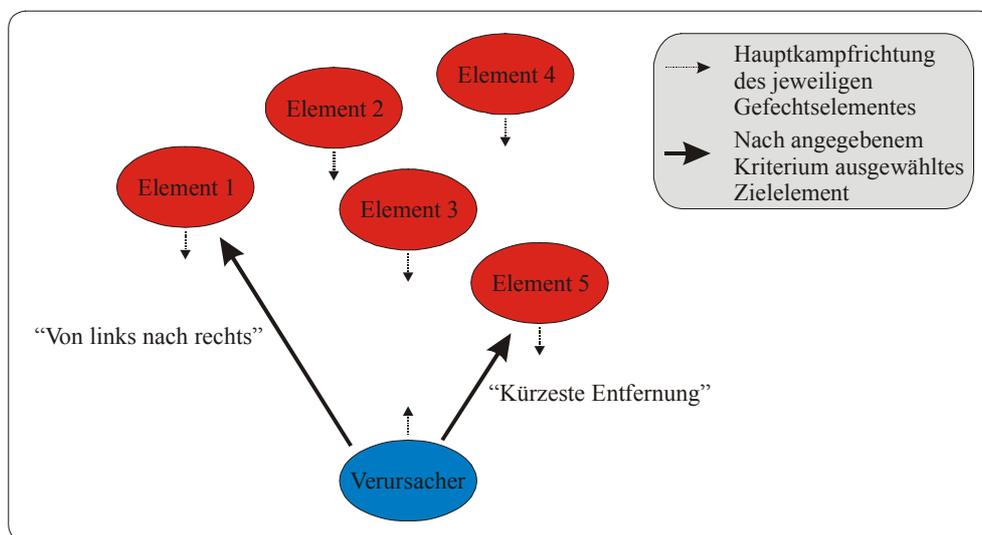


Abbildung 5.6: Zielauswahl nach geometrischen Kriterien

Nach Abschluss der Zielauswahl ist somit die Situation gegeben, dass ein Verursachergefechtselement (V) mit einer gegebenen Zahl $\bar{a}(V)$ schießaktiver Einzelsysteme ein ausgewähltes feindliches Erleidergefechtselement (E) mit einer ebenfalls gegebenen Zahl $\bar{b}_{DISC}(E)$ entdeckter und erleideraktiver Einzelsysteme bekämpfen und somit abnutzen will. Hierbei stellt sich nun die Frage, wie das Feuer der $\bar{a}(V)$ schießaktiven Einzelsysteme auf die $\bar{b}_{DISC}(E)$ erleideraktiven Einzelsysteme verteilt wird, d.h. ob und in welchem Maße es zu Doppelbekämpfungen von Einzelsystemen des Erleiders durch zwei oder mehr Einzelsysteme

²⁰⁰ Für eine Einführung in die Theorie der multidimensionalen Nutzwertanalyse siehe etwa [Bechmann 78] oder [Zangenmeister 76]. Eine beispielhafte Anwendung zur Zielauswahl findet sich in [Beckert 98].

²⁰¹ Es ist z.B. denkbar, dass während einer ersten Phase eines Gefechtes ein Verteidiger angreifende Gefechtselemente nach der von ihnen ausgehenden Gefährdung bewertet und dies vor allem an Typ, waffentechnischer Leistungsfähigkeit und Entfernung der Einzelsysteme festmacht. Sind diese Angreifergefechtselemente jedoch auf eine im Vorfeld befindliche Minensperre aufgelaufen, so ist es nun denkbar, dass durch den Verteidiger vorrangig solche Gefechtselemente bekämpft werden, welche auf Seiten des Angreifers zur Beseitigung dieser Sperre wesentlich beitragen können.

des Verursachers kommt.²⁰² Benötigt wird somit eine Ansatz zur Feuerallokation, welcher in Abhängigkeit von dem gegebenen Verhältnis von $\bar{a}(V)$ zu $\bar{b}_{DISC}(E)$ jedem schießaktiven Einzelsystem des Verursachers ein erleideraktives Einzelsystem des Erleiders als Ziel zuweist. Denkbare Ansätze hierzu umfassen etwa:

- *Rein zufällige Feuerallokation:* Hierbei erhalten die schießaktiven Einzelsysteme des Verursachers ihre jeweiligen Ziele anhand eines vorgegebenen Zufallsprozesses zugewiesen. In Abhängigkeit von $\bar{a}(V)$, $\bar{b}_{DISC}(E)$ und dem gewählten Zufallsprozess, kann es dabei zu ungewollten Doppelbekämpfungen kommen.
- *Perfekte Feuerallokation:* In Abhängigkeit von $\bar{a}(V)$ und $\bar{b}_{DISC}(E)$ wird jedem schießaktiven Einzelsystem koordiniert ein erleideraktives Einzelsystem als Ziel zugewiesen. Falls $\bar{a}(V) > \bar{b}_{DISC}(E)$ gilt, kommt es hierbei – sofern gewünscht – zu $\bar{a}(V) - \bar{b}_{DISC}(E)$ gewollten Doppelbekämpfungen. Gilt dagegen $\bar{a}(V) \leq \bar{b}_{DISC}(E)$ so kommt es zu keinen Doppelbekämpfungen, d.h. das verfügbare Feuer des Verursachers wird stets perfekt auf die erleideraktiven Einzelsysteme des Erleiders verteilt.
- *Gemischte Feuerallokation:* Hierunter sollen Mischformen der beiden bereits vorgestellten Ansätze verstanden werden, welche zum Beispiel für einen gewissen Anteil der schießaktiven Einzelsysteme des Verursachers eine perfekte und für die restlichen Systeme eine rein zufällige Feuerallokation vorsehen.

Ansätze der gemischten Feuerallokation erlauben es, in einem gewissen Rahmen weiche Einflussfaktoren, z.B. Human Factors, in einem Gefecht zu berücksichtigen. Die Höhe des perfekt koordiniert feuernden Anteils der Einzelsysteme des Verursachers kann dabei etwa dazu genutzt werden, den Ausbildungsstand oder die Erregung der Bediener der jeweils abgebildeten Waffensysteme zu modellieren. Selbstverständlich ist dies aber auch ein Weg, um technische Gegebenheiten einzelner Parteien abzubilden, da Feuerallokation in Kampfgemeinschaften nur in lokal eng begrenzter Umgebung verbal und ohne entsprechende technische Unterstützung überhaupt möglich ist. Untersuchungen etwa zur Auswirkung moderner Führungsinformationssysteme in Gefechtsfahrzeugen, könnten sich somit entsprechender Ansätze bedienen.

²⁰² Aus dem zu Beginn des Kapitels genannten *Prinzip der geschlossenen Bekämpfung* ergibt sich dabei für $\bar{a}(V) > \bar{b}_{DISC}(E)$, d.h. den Fall, dass mehr schießaktive Einzelsysteme des Verursachers als erleideraktive Einzelsysteme des Erleiders vorhanden sind, potentiell die Möglichkeit einer Anzahl von $\bar{a}(V) - \bar{b}_{DISC}(E)$ gewollter Doppelbekämpfungen. Es sind jedoch durchaus Waffensystemtypen (z.B. Lenkwaffensysteme) denkbar, bei denen aus Kostengründen oder einer beschränkten Verfügbarkeit grundsätzlich keine gewollten Doppelbekämpfungen durchgeführt werden.

5.1.4.4 Bewegung beim Leitschützenprinzip

Im Rahmen der Abbildung der Bewegung von Gefechtselementen beim Leitschützenprinzip kann erneut auf bereits bekannte und bewährte Algorithmen²⁰³ hochauflösender Gefechtssimulationssysteme zurückgegriffen werden. Die für die Algorithmen zur Wegsuche und anschließenden Bewegungsabbildung benötigten Geländedaten sowie Typ- und Positionsdaten der Einzelsysteme sind im Modell stets vorhanden, so dass nur geringer zusätzlicher Anpassungsbedarf besteht.

Während der Bewegung eines Gefechtselementes kann es jedoch vorkommen, dass zu einem vorgegebenen Zielpunkt ein gewisser Anteil der Einzelsysteme des Elements durch Beschuss niedergehalten wird. Da das Leitschützenprinzip davon ausgeht, dass elementare Gefechtsprozesse und damit auch Bewegungen durch Einzelsysteme eines Gefechtselements grundsätzlich geschlossen durchgeführt werden, muss die Bewegungssteuerung auf ein solches Ereignis reagieren, da niedergehaltene Einzelsysteme nicht oder zumindest nur mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit zur Fortbewegung fähig sind. Als mögliche Reaktionen der Bewegungssteuerung bieten sich unter anderem die folgenden Alternativen an:

- *Keine Reaktion auf Niederhaltung:* Dies bedeutet, dass das Gefechtselement seine Bewegung unabhängig von der Zahl niedergehaltener Einzelsysteme mit konstanter Geschwindigkeit fortsetzt. Die übrige Auswirkung der Niederhaltung²⁰⁴ auf das Verhalten des Gefechtselementes bleiben davon unberührt. Diese Vorgehensweise ist leicht umsetzbar, kommt jedoch der Realität insbesondere für abgesessene Infanteriekräfte nicht sehr nahe, da für die niedergehaltenen Einzelsysteme somit einerseits angenommen wird, dass sie in Deckung gehen und dadurch weder „schießaktiv“ noch „erleideraktiv gegenüber Flachfeuer“ sind, andererseits jedoch unterstellt wird, dass ihr Bewegungsprozess unbeeinflusst bleibt.
- *Unterbrechung des Bewegungsprozesses:* Bei dieser Alternative wird der Bewegungsprozess des aggregierten Gefechtselements bei Niederhaltung auch nur eines einzigen seiner Einzelsysteme stets komplett unterbrochen. Das Element wartet mit der Fortsetzung seiner Bewegung somit auf den Zeitpunkt, zu dem die Niederhaltewirkung bei allen Einzelsystemen wieder beendet ist. Besonders bei Gefechtselementen mit einer großen Mächtigkeit, d.h. einer hohen Anzahl von Einzelsystemen, kann diese Vorgehensweise jedoch offensichtlich zu einer Verzerrung der Abbildung des Gefechts führen. Um die Problematik zu verdeutlichen, betrachte man den folgenden Fall eines Gefechtselementes, welches eine Infanteriegruppe repräsentieren soll. Das Gefechtselement besitzt zu diesem Zweck die Mächtigkeit 12, d.h. es verfügt über 12 Einzelsysteme des Typs Infanterist. Gerät dieses Element nun während seiner Bewegung unter Beschuss und wird dabei einer der Infanteristen niedergehalten, würden bei der beschriebenen Vorgehensweise auch die restlichen 11 Infanteristen ihre Bewegung unterbrechen, bis die Niederhaltewirkung bei dem betroffenen Schützen aufhört. Ein derartiges Verhalten der abgebildeten Infanteriegruppe divergiert jedoch sehr stark von dem zu erwartenden Verhalten einer realen Infanteriegruppe besonders in der Sturm- und Einbruchphase eines Gefechts, da in der Realität die 11 weiteren Schützen einer Gruppe ihre Bewegung, also den Sturm- und Einbruchlauf, normalerweise nicht unterbrechen würden, um auf den 12. Schützen zu warten.

²⁰³ vgl. [Pöttsch 97], S. 72ff

²⁰⁴ vgl. Kapitel 6.1.4.6, Nr. (5)

- *Ausgliedern niedergehaltener Einzelsysteme:* Eine weitere mögliche Reaktion der Bewegungssteuerung auf das Niederhalten einiger Einzelsysteme eines in Bewegung befindlichen Gefechtselementes stellt die Ausgliederung der betroffenen Einzelsysteme aus dem ursprünglichen Gefechtselement dar. Die Mächtigkeit dieses Gefechtselementes würde dazu um die Zahl niedergehaltener Einzelsysteme verringert, das verkleinerte Gefechtselement könnte seinen Bewegungsprozess jedoch unverändert fortführen. Die niedergehaltenen und deshalb ausgegliederten Einzelsysteme können in einem bzw. mehreren neuen autarken Gefechtselementen zusammengefasst werden, wobei das neue Gefechtselement Auftrag und Ziel der Bewegung des ursprünglichen Gefechtselementes übernimmt und die unterbrochenen Bewegung nach Ende der Niederhaltewirkung auf dem berechneten Weg fortsetzt. Weiterhin kann gegebenenfalls vorgesehen werden, dass sich das ursprüngliche sowie das neu gebildete Gefechtselement wieder vereinigen, d.h. die ausgegliederten Einzelsysteme wieder in das ursprüngliche Gefechtselement aufgenommen werden, sobald die Distanz zwischen den beiden Elementen einen vorgegebenen Wert unterschreitet. Diese Art der Modellierung dürfte als ziemlich realitätsnah zu bewerten sein, kann jedoch in einem modellierten Gefecht schnell dazu führen, dass die Zahl abgebildeter autarker Gefechtselemente aufgrund häufiger Ausgliederungen stark anwächst, wohingegen die Mächtigkeit der einzelnen Elemente stetig sinkt. Dies führt zu einem erhöhten Verwaltungsaufwand des Systems sowie zu einem, durch ständige Ein- bzw. Ausgliederungsprozesse gesteigertem Rechenaufwand. Der ursprünglich beabsichtigte Aggregationseffekt des Leitschützenprinzips würde somit für bewegte und zugleich aggregierte Elemente unterlaufen.
- *Anpassung der Geschwindigkeit:* Diese in verschiedenen Ausprägungen mögliche Alternative geht von der Tatsache aus, dass bei der Bewegung der aggregierten Gefechtselemente nicht separate Einzelsysteme sondern vielmehr der Schwerpunkt der Gruppe von Einzelsystemen bewegt wird, welche in ihrer Gesamtheit das Gefechtselement bilden. Der Ansatz basiert deshalb darauf, die jeweilige Bewegungsgeschwindigkeit des Gefechtselementes der Zahl niedergehaltener Einzelsysteme des Elements anzupassen. Denkbar ist es dabei etwa, die Geschwindigkeit des Gefechtselementes jeweils auf den Anteil der vorgesehenen Geschwindigkeit zu reduzieren, welcher prozentual dem Anteil der nicht niedergehaltenen an der Anzahl der nicht ausgefallenen Einzelsysteme des Elements entspricht. Stellt man sich etwa ein Gefechtselement der Mächtigkeit 12 vor, welches sich mit einer Geschwindigkeit von 3 [m/sec] fortbewegt, so würde dieser Ansatz dazu führen, dass sich die nunmehr angenommene mittlere Geschwindigkeit des Elementes bei Niederhaltung von 2 (6) der 12 Einzelsysteme auf 2,5 (1,5) [m/sec] reduziert.

5.2 Mögliche Vorteile des Leitschützenprinzips

Der Ansatz des Leitschützenprinzips zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen erlaubt in nachvollziehbarer Weise eine flexible Aggregation durch Variation der verwendeten Mächtigkeiten der abgebildeten Gefechtselemente. Aggregierte Eingabedaten sind dazu nur in geringer Zahl, etwa bei der Abbildung der Feuerallokation, notwendig und können unabhängig von dem jeweiligen Aggregationsgrad gewählt werden, d.h. sie haben auch bei Veränderung der Mächtigkeit der Gefechtselemente Bestand. Da stets davon auszugehen ist, dass ein Gefechtselement seine jeweils aktuelle Mächtigkeit durch Abnutzung bis hin zu einem Einzelsystem verändern kann, muss zusätzlich die Modifikation der aggregierten Algorithmen zur Abbildung der Gefechtsprozesse gegenüber den ursprünglichen Algorithmen zur Einzelabbildung in Bezug auf variierende Mächtigkeiten flexibel gehalten werden. Insbesondere bedeutet dies, dass die aggregierten Algorithmen in der Lage sein müssen, auch eine Einzelabbildung zu realisieren, wobei die aggregierten Zusatzdaten dann offensichtlich ihre Bedeutung verlieren.

Aus den genannten Gründen ist somit damit zu rechnen, dass sich das Leitschützenprinzip bei sinnvoller Umsetzung als deutlich weniger szenarabhängig erweist, als bisher bekannte Aggregationsansätze dies im Allgemein konnten. Die hohe Flexibilität der Aggregation erlaubt es darüber hinaus, Teile der in Kapitel 3.2.2 genannten Vorteile aggregierter Modellierung, wie etwa die *Behandlung unscharfer Fragestellungen*, für einen Benutzer in einem grundsätzlich hochauflösenden Modell nutzbar zu machen.

Neben der gegebenen Flexibilität in der Aggregation besteht ein weiterer gewünschter Vorteil der Anwendung des Leitschützenprinzips in Gefechtssimulationssystemen vor allem in dem zu erwartenden Rechenzeitgewinn. Dieser resultiert aus den bereits beschriebenen beiden Hauptaspekten der Aggregation im Leitschützenprinzip²⁰⁵, d.h. zum Einen aus der reduzierten Anzahl eigenständig agierender Gefechtselemente sowie zum Anderen aus der ebenfalls reduzierten Anzahl notwendiger Geländeschnitte zur Sichtlinienermittlung. Der exakte Rechenzeitgewinn, welcher durch diese Form der Aggregation erreicht werden kann, hängt im Detail natürlich von der gewählten Modellierung der elementaren Gefechtsprozesse der aggregierten Elemente ab und dabei vor allem von den bereits angesprochenen Modifikationen der ursprünglichen Algorithmen.

Die **reduzierte Anzahl eigenständig agierender Gefechtselemente** durch Beschränkung der Abbildung der elementaren Gefechtsprozesse auf die \bar{N}_B / \bar{N}_R aggregierten Elemente führt dazu, dass sich die Zahl der zu einem Zeitpunkt möglichen Aktionen bzw. Interaktionen erheblich verringert. Insbesondere hat dies zur Folge, dass Aufklärungs- und Abnutzungsprozesse nur noch zwischen aggregierten Elementen und nicht länger zwischen individuellen Einzelsystemen stattfinden. Waren ursprünglich zu einem Zeitpunkt theoretisch insgesamt jeweils maximal $(N_B + N_R)$ individuelle Bewegungs-, Aufklärungs- bzw. Bekämpfungsprozesse der einzelnen Systeme möglich, welche durch das Gefechtssimulationssystem als Ereignisse verwaltet und simuliert werden mussten, so reduzieren sich diese Zahlen durch Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips auf $(\bar{N}_B + \bar{N}_R)$ mögliche individuelle Bewegungs-, Aufklärungs- und Bekämpfungsprozesse. Das folgende einfache Beispiel soll hier zur Erläuterung beitragen:

²⁰⁵ vgl. Kapitel 5.1.1, S. 101f

Auf einem Gefechtsfeld stehen sich zwei Parteien Rot / Blau mit jeweils 12 homogenen Einzelsystemen (z.B. KPz) gegenüber. Findet keine Aggregation statt, so können theoretisch alle Einzelsysteme gleichzeitig einen oder mehrere der elementaren Gefechtsprozesse durchführen, d.h. es sind pro Partei insgesamt maximal 36 individuelle Bewegungs-, Aufklärungs- und Bekämpfungsvorgänge möglich. Durch Anwendung des Leitschützenprinzips werden jeweils 3 Einzelsysteme einer Partei in einem aggregierten Element zusammengefasst, so dass Rot / Blau danach über jeweils 4 aggregierte Elemente verfügen. Damit reduziert sich für jede Partei die Zahl theoretisch möglicher Bewegungs-, Aufklärungs- und Bekämpfungsvorgänge auf insgesamt 12. Betrachtet man beide Parteien zusammengekommen so reduziert sich die Zahl individueller Gefechtsprozesse, welche durch das System maximal gleichzeitig verwaltet und simuliert werden müssen von insgesamt 72 durch Anwendung des Leitschützenprinzips auf 24, d.h. ein Drittel.

Geht man im Beispiel vereinfachend von einer konstanten Rechenzeit $t_{\text{Sys}}(\text{Event})$ Sekunden aus, welche die Verarbeitung eines Ereignisses im Falle der Einzelabbildung im Mittel benötigt sowie im aggregierten Fall von einer Rechenzeit $\bar{t}_{\text{Sys}}(\text{Event})$, so lässt sich leicht nachvollziehen, dass diese Reduktion der individuellen Gefechtsprozesse einen absoluten Rechenzeitgewinn bedeutet unter der Annahme

$$\bar{t}_{\text{Sys}}(\text{Event}) = t_{\text{Sys}}(\text{Event}) + \varepsilon_{\text{EVT}}(\bar{a}) \quad (5.7)$$

wobei

- $\varepsilon_{\text{EVT}}(\bar{a})$ = Zusätzlicher Zeitbedarf, welcher sich aus den für die Aggregation notwendigen Anpassungen der Algorithmen herleitet
- \bar{a} = Gewählter Aggregationsgrad, d.h. im Beispiel einheitliche Mächtigkeit der aggregierten Gefechtselemente von 3

solange gilt:

$$2 \cdot \bar{t}_{\text{Sys}}(\text{Event}) > \varepsilon_{\text{EVT}}(\bar{a}) \quad (5.8)$$

da:

$$72 \cdot t_{\text{Sys}}(\text{Event}) > 24 \cdot (t_{\text{Sys}}(\text{Event}) + \varepsilon_{\text{EVT}}(\bar{a})) \quad \Leftrightarrow$$

$$48 \cdot t_{\text{Sys}}(\text{Event}) > 24 \cdot \varepsilon_{\text{EVT}}(\bar{a}) \quad \Leftrightarrow$$

$$2 \cdot \bar{t}_{\text{Sys}}(\text{Event}) > \varepsilon_{\text{EVT}}(\bar{a})$$

d.h. der durch die Aggregation auftretende zusätzliche Rechenzeitbedarf pro Ereignisverarbeitung die ursprünglich benötigte Rechenzeit nicht um mehr als das doppelte übersteigt.

Betrachtet man die **Reduktion der Anzahl notwendiger Geländeschnitte zur Sichtlinienbestimmung** als zweite Ursache für einen möglichen Rechenzeitgewinn durch Anwendung des Leitschützenprinzips anhand des obigen Beispiels, so ergibt sich analog:

Im Falle der individuellen Abbildung aller insgesamt 24 Einzelsysteme der Parteien Blau und Rot wären insgesamt mindestens²⁰⁶ 12² Sichtlinienberechnungen und damit die entsprechende Anzahl von Geländeschnitten notwendig. Werden nun durch Anwendung des Leitschützenprinzips wieder jeweils 3 Einzelsysteme einer Partei in einem aggregierten Element zusammengefasst, so reduziert sich die Gesamtzahl benötigter Sichtlinienbestimmungen auf 8².

Nimmt man nun im Beispiel wiederum vereinfachend an, dass ein Geländeschnitt im Falle der Einzelabbildung $t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight})$ Sekunden sowie im aggregierten Fall $\bar{t}_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight})$ Sekunden Rechenzeit benötigt, so lässt sich mit

$$\bar{t}_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) = t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) + \varepsilon_{\text{LOS}}(\bar{a}) \quad (5.9)$$

wobei

- $\varepsilon_{\text{LOS}}(\bar{a})$ = Zusätzlicher Zeitbedarf, welcher sich aus den für die Aggregation notwendigen Anpassungen der Algorithmen herleitet
- \bar{a} = Gewählter Aggregationsgrad, d.h. im Beispiel einheitliche Mächtigkeit der aggregierten Gefechtselemente von 3

erneut ein absoluter Rechenzeitgewinn im aggregierten Fall nachweisen, solange gilt:

$$8 \cdot t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) > \varepsilon_{\text{LOS}}(\bar{a}) \quad (5.10)$$

Dies resultiert aus:

$$\begin{aligned} 12^2 \cdot t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) > 4^2 \cdot (t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) + \varepsilon_{\text{LOS}}(\bar{a})) & \Leftrightarrow \\ 128 \cdot t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) > 16 \cdot \varepsilon_{\text{LOS}}(\bar{a}) & \Leftrightarrow \\ 8 \cdot t_{\text{Sys}}(\text{LineOfSight}) > \varepsilon_{\text{LOS}}(\bar{a}) & \end{aligned}$$

Dies bedeutet im Beispiel, dass ein absoluter Rechenzeitgewinn zu erwarten ist, solange der durch die Aggregation zusätzlich pro Sichtlinienbestimmung notwendige Rechenzeitaufwand das achtfache der ursprünglich pro Sichtlinienbestimmung insgesamt benötigten Rechenzeit nicht überschreitet. Im Falle der Sichtlinienbestimmung tritt zusätzlicher Rechenzeitbedarf nur auf, wenn die Methode der Koordinatenschwerpunktberechnung verwendet wird. Es scheint jedoch auch dann unwahrscheinlich, dass der dabei benötigte Rechenaufwand für die algorithmisch relativ einfache Ermittlung des Koordinatenschwerpunktes den Rechenzeitaufwand der komplexen Berechnungen eines Geländeschnittes um mehr als das achtfache

²⁰⁶ Die hier genannte Anzahl geht davon aus, dass eine Sichtlinienbestimmung nur einmal für jede Kombination eines blauen mit einem roten Einzelsystem stattfindet. Geschieht die Sichtlinienbestimmung dagegen einmal aus blauer und anschließend aus roter Sicht, da beide Parteien z.B. über unterschiedlich leistungsfähige technische Aufklärungsmittel verfügen, welche gewisse Bewuchstypen durchdringen bzw. nicht durchdringen, so wird diese Anzahl offensichtlich verdoppelt.

überschreitet, so dass auch in diesem Fall durch die Aggregation mit einem absoluten Rechenzeitgewinn zu rechnen ist.

Abschließend bleibt noch einmal festzuhalten, dass der aus der Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips zu erwartende tatsächliche Rechenzeitgewinn pro Simulationslauf in hohem Maße von der gewählten Gesamtmodellierung abhängt, da bei der Modellierung anderer elementarer Gefechtsprozesse durch notwendige aggregierte Modellierungsbesonderheiten, wie etwa der Feuerallokation oder der Behandlung des Problems von Bewegung und Niederhaltung, zusätzlicher Rechenzeitbedarf entsteht, welcher in diesen Fällen nicht direkt durch einen aggregationsbedingten Rechenzeitgewinn kompensiert werden kann.

5.3 Problemfelder und Grenzen der Anwendung des Leitschützenprinzips

5.3.1 Ausgewählte Maßgrößen für die Bewertung des Leitschützenprinzips

Neben den genannten Vorteilen sind für eine Bewertung des Leitschützenprinzips natürlich vor allem inhärente Problemfelder und Grenzen ausschlaggebend, welche die Güte der Abbildung beeinflussen können. Unter Güte der Abbildung ist hierbei die Frage nach Konsistenz in der Abbildung zu verstehen, d.h. ob wesentliche Maßgrößen der aggregierten Abbildung des Gefechts in vertretbaren Grenzen mit den Resultaten und dem Verlauf der Werte der Einzelabbildung übereinstimmen.

Für die im Folgenden stattfindende Bewertung der Aggregation durch Anwendung des Leitschützenprinzips können dabei als wesentliche Maßgrößen unter anderem identifiziert werden:

- *Relative Gewinnhäufigkeit*: Dies bezeichnet die relative Häufigkeit, mit welcher eine der beiden Parteien ein gegebenes Szenar im Rahmen einer großen Zahl von Simulationsläufen für sich entscheiden kann. Diese Bewertungsgröße ist in leicht nachvollziehbarer Weise ein Gütemaß für den gewählten Aggregationsansatz. Würde die Gewinnhäufigkeit durch Aggregation mit dem Leitschützenprinzip einer signifikanten Änderung unterliegen, so würde dies offensichtlich den Wert des Ansatzes in Frage stellen.
- *Mittlere Dauer des Gefechts*: Dies bezeichnet die simulierte Zeit, welche im Modell im Mittel vergeht, bevor eine der beiden Parteien das Gefecht bei gegebenem Szenar für sich entschieden hat. Auch hier würde eine Veränderung der Bewertungsgröße durch Anwendung des Leitschützenprinzips die Güte der Abbildung verschlechtern. Um dies nachzuvollziehen, ist es notwendig, dass jeweilige Gefecht als Untergefecht im Rahmen einer größeren Auseinandersetzung zu begreifen. Die überlebenden Kräfte der siegreichen Partei sind dann nämlich in der Lage nach Beendigung dieses Untergefechts in weitere Untergefechte der Auseinandersetzung einzugreifen. Geschieht dies durch Aggregation erheblich früher oder später im Vergleich zur Modellierung des Gefechts mit Einzelabbildung, so kann sich der Verlauf des Gesamtgefehchts dadurch offensichtlich deutlich verändern.
- *Mittlere Endstärke der siegreichen Partei*: Hierunter ist die Zahl aktiver Einzelsysteme zu verstehen, welche der siegreichen Partei im Mittel nach Beendigung eines Gefechts verbleiben. Auch diese Bewertungsgröße erlangt analog zur Dauer des Gefechts Bedeutung für die Güte der Abbildung, sobald man das einzelne Gefecht wiederum nur als Untergefecht einer größeren Auseinandersetzung begreift. Würde das Leitschützenprinzip dazu führen, dass eine gegenüber der Einzelabbildung deutlich größere oder kleinere Zahl aktiver Einzelsysteme des Siegers in das weitere Gefechtsgeschehen eingreifen können, so würde dies in nachvollziehbarer Weise den Verlauf des Gesamtgefehchtsgeschehens beeinflussen.
- *Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte*: Diese Bewertungsgröße beschreibt den Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte beider Parteien über der Simulationszeit, d.h. den mittleren Abbau der Anfangsstärken beider Parteien im Verlauf eines simulierten Szenars. Eine Veränderung dieser Bewertungsgröße durch Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips würde offensichtlich ebenfalls eine wesentliche Verfälschung der Abbildung des eigentlichen Gefechtsverlaufes gegenüber der Einzelsystemabbildung dar-

stellen, da nun zu gleichen Simulationszeitpunkten im aggregierten bzw. nicht aggregierten Fall unter Umständen deutlich unterschiedliche Reststärken der beteiligten Parteien existieren würden.

Betrachtet man nun die Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkung auf diese Bewertungsgrößen, so lassen sich potentielle Problemfelder und somit Grenzen bei der Anwendung des Ansatzes identifizieren, welche aus den bereits genannten zwei Hauptaspekten der Aggregation, d.h. der Zusammenfassung homogener Einzelsysteme in aggregierten Elementen und der damit verbundenen Beschränkung möglicher Aktionen und Interaktionen auf diese Elemente, resultieren.

5.3.2 Problem asymmetrischer Mächtigkeiten

Im Rahmen des Leitschützenprinzips kann es sich als problematisch erweisen, wenn bei der Aggregation der Kräfte feindlicher Parteien **unterschiedliche Mächtigkeiten** verwendet werden, d.h. wenn eine der Parteien stärker aggregiert abgebildet wird, als dies bei ihrem Gegner der Fall ist. Dies führt durch die Beschränkung individueller Aktionsmöglichkeiten auf die Gefechtselemente dazu, dass die weniger aggregierte Partei in einem vorgegebenen Zeitraum deutlich mehr individuelle Gefechtsprozesse auslösen und damit unter Umständen insbesondere auch eine größer Zahl feindlicher Elemente bekämpfen kann, als dies die stärker aggregierte feindliche Partei vermag. Unter Umständen kann das zu einer Verschiebung der Gewinnwahrscheinlichkeiten und damit zur einer fehlerhaften Modellierung des Gefechts führen. Nachvollziehen lässt sich diese Problematik anhand des folgenden Beispiels.²⁰⁷

Es stehen sich zwei Parteien Blau / Rot mit jeweils 10 homogenen Einzelsystemen in einer perfekten Duellsituation gegenüber (d.h. $N_B = N_R = 10$ und $s = u = 1$). Es soll dabei angenommen werden, dass alle Gefechtselemente beider Parteien zu jeweils den gleichen Zeitpunkten feuern und über eine perfekte Feuerkoordination²⁰⁸ – auch zwischen den einzelnen aggregierten Gefechtselementen²⁰⁹ – sowie eine hundertprozentige Treffer- und Vernichtungswahrscheinlichkeit verfügen. Das Gefecht zwischen diesen beiden Parteien soll unter Anwendung des Leitschützenprinzips modelliert werden, wobei die Mächtigkeiten der Gefechtselemente, in welchen die Einzelsysteme der beiden Parteien zusammengefasst werden, variiert werden. Im ersten Fall bilden beide Parteien ihre Systeme durch jeweils ein Element der Mächtigkeit 10 ab ($\bar{N}_B = \bar{N}_R = 1$ und $\bar{a}_{11} = \bar{b}_{11} = 10$). Im zweiten Fall bildet Partei Blau ihre Systeme wiederum durch ein Element der Mächtigkeit 10 ($\bar{N}_B = 1$ und $\bar{a}_{11} = 10$), die Partei Rot dagegen nun ihre Systeme durch zwei Elemente der Mächtigkeit fünf ($\bar{N}_R = 2$, $v = 1$ und $\bar{b}_{11} = 5$) ab. Betrachtet man das abgebildete Gefecht im ersten Fall, so ergibt sich zu den Zeitpunkten t_0 und t_1 :

- t_0 : B_1^{10} bekämpft R_1^{10} und R_1^{10} bekämpft B_1^{10}
 t_1 : B_1^{10} und R_1^{10} verlieren auf Grund der Bekämpfung und der angenommenen hundertprozentigen Treffer- und Vernichtungswahrscheinlichkeit jeweils alle 10 Systeme, das Gefecht endet somit unentschieden mit der völligen Vernichtung beider Parteien.

Betrachtet man dagegen das Gefecht im zweiten Fall, so ergibt sich zu den gleichen Zeitpunkten t_0 und t_1 :

- t_0 : B_1^{10} bekämpft R_1^5 , R_1^5 bekämpft B_1^{10} , R_2^5 bekämpft ebenfalls B_1^{10}

²⁰⁷ Das vorliegende Beispiel geht bewusst von der atypischen Annahme hundertprozentiger Treffer- und Vernichtungswahrscheinlichkeiten aus, um das betrachtete Problem besonders zu verdeutlichen. Im Fall geringer Treffer- und/oder Vernichtungswahrscheinlichkeiten würde die beschriebene Problematik nur in sehr abgeschwächter Form auftreten, da nun vermutlich das abgebildete Gefecht nicht nach bereits nur einem Schusswechsel beendet wäre und somit das stärker aggregierte Gefechtselemente gegebenenfalls im Verlauf mehrerer Schusswechsel sein Feuer auf verschiedene feindliche Gefechtselemente verteilen könnte.

²⁰⁸ d.h. es kommt zu keinen ungewollten Doppelbekämpfungen

²⁰⁹ Über eine Feuerkoordination zwischen mehreren aggregierten Gefechtselementen wurde bisher im Modell keine Aussage gemacht. Das Vorhandensein einer solchen Feuerkoordination wird jedoch im vorliegenden Beispiel zur deutlicheren Darstellung des potentiellen Problems angenommen.

t₁: B₁¹⁰ verliert auf Grund der Bekämpfung durch R₁⁵ und R₂⁵ alle seiner 10 Einzelsysteme, R₁⁵ verliert auf Grund der Bekämpfung durch B₁¹⁰ alle seine 5 Einzelsysteme. Das Gefecht endet, da die Partei Blau vollständig vernichtet wurde, R₂⁵ jedoch unbekämpft blieb, mit einem Sieg der roten Partei.

Es wird somit deutlich, dass unterschiedlich gewählte Mächtigkeiten besonders in Verbindung mit hohen Treffer- und Vernichtungswahrscheinlichkeiten (vgl. Fußnote 207) sowie einer angenommenen perfekten Feuerkoordination Einfluss auf die Gewinnwahrscheinlichkeiten der am Gefecht beteiligten Parteien haben können. Um dies zu verhindern, sollten deshalb bei der Aggregation im Rahmen des Leitschützenprinzips darauf geachtet werden, vergleichbare Mächtigkeiten für die korrespondierenden Gefechtselemente aller am Gefecht beteiligten Parteien zu verwenden. Als korrespondierend sollten dabei solche Gefechtselemente betrachtet werden, welche Einzelsysteme in sich zusammenfassen, die einerseits auf Grund ihres Typs und ihres Einsatzspektrums entweder als vergleichbar zu bewerten sind²¹⁰ oder andererseits solche, bei denen damit zu rechnen ist, dass sie im späteren Gefecht gegeneinander eingesetzt werden²¹¹.

Neben der anfänglichen Festsetzung der Mächtigkeit im Rahmen der Anwendung des Leitschützenprinzips durch einen Benutzer, kann auch die dynamische Veränderung der aktuellen Mächtigkeit einzelner Gefechtselemente durch Abnutzung während eines simulierten Gefechtsverlaufs dazu führen, dass Gefechtselemente mit deutlich unterschiedlicher Mächtigkeit aufeinander treffen. Es ist dabei jedoch davon auszugehen, dass dieser Effekt nur in Einzelfällen auftritt und somit nicht zu einer systematischen Verfälschung des Gefechtsverlaufes und damit der Ergebnisse einer Simulation führen kann.

Die angeführte Problematik variierender Mächtigkeiten wird in Kapitel 7 im Rahmen einer Reihe entsprechender Versuche experimentell untersucht und die gewonnenen Ergebnisse dargestellt.

²¹⁰ Dies bedeutet, dass z.B. alle Schützentrupps oder Kampfpanzer der beteiligten Parteien in Gefechtselemente vergleichbarer Mächtigkeit zusammengefasst werden.

²¹¹ Darunter ist zu verstehen, dass beispielsweise Kampfpanzer auf der einen und Panzerabwehrwaffensysteme auf der anderen Seite in Gefechtselementen vergleichbarer Mächtigkeit zusammengefasst werden. Würde man stattdessen z.B. Kampfpanzer der Partei Rot in Gefechtselementen der Mächtigkeit 3, Panzerabwehrwaffensysteme (z.B. Panzerfäuste) der Partei Blau dagegen in Gefechtselementen der Mächtigkeit 6 zusammenfassen, so könnte dies zu den im oben angeführten Beispiel beschriebenen Verschiebungen der Gewinnwahrscheinlichkeit führen.

5.3.3 Problem des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen

Bei der Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips wird die Bestimmung der vorhandenen Sichtlinien auf aggregierte Gefechtselemente beschränkt und die dazu benötigten Geländeschnitte zwischen deren fiktiven Koordinatenpositionen durchgeführt. Diese pauschalisierte Sichtlinienbestimmung ist ausschlaggebend für die Entscheidung, ob eine Bekämpfung möglich ist oder nicht. Durch diese Vorgehensweise geht jedoch augenscheinlich Information verloren, da die genaue räumliche Dislozierung der Einzelsysteme jedes Gefechtselementes nicht länger berücksichtigt wird. Es stellt sich somit die Frage, wie groß dieser Informationsverlust ist und welche Auswirkungen auf die Güte der aggregierten Abbildung er mit sich bringt.

Der beschriebene Informationsverlust ist als unkritisch zu beurteilen so lange für die Einzelsysteme eines Gefechtselementes von einem praktisch einheitlichen Sichtbereich ausgegangen werden kann, d.h. so lange im Falle der individuellen Abbildung für alle Einzelsysteme identische bzw. zumindest weitestgehend identische Sichtbereiche ermittelt werden. Würden sich die Sichtbereiche der Einzelsysteme im Falle der Einzelabbildung dagegen deutlich unterscheiden, so kann die Aggregation zu einer Über- bzw. Unterbewertung der Sichtmöglichkeiten der Einzelsysteme eines Gefechtselementes führen, welche in einer Verfälschung der Abbildung des Gefechts resultiert. Unter einer Über- bzw. Unterbewertung der Sichtmöglichkeiten der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes ist dabei die Tatsache zu verstehen, dass für alle Einzelsysteme eines Gefechtselementes pauschal entschieden wird, ob eine Sichtverbindung zu allen Einzelsystemen eines feindlichen Gefechtselementes existiert oder nicht. Dies kann dazu führen, dass Sichtverbindungen zwischen Einzelsystemen verworfen bzw. angenommen werden, obwohl sie im Falle einer Einzelabbildung existieren bzw. nicht existieren würden (vgl. Abbildung 5.7). Aus dieser Über- bzw. Unterbewertung kann wiederum der Effekt resultieren, dass Einzelsysteme im Verbund eines aggregierten Gefechtselementes feindliche Einzelsysteme bekämpfen, obwohl zwischen ihren individuellen Koordinatenpositionen keine Sichtverbindung besteht und vice versa. Dies führt offensichtlich gegenüber der Einzelabbildung zu einer Verfälschung der Abbildung des Gefechtsverlaufes im aggregierten Fall.

Das Auftreten dieser Problematik hängt dabei wesentlich von benutzerabhängigen Vorgaben bezüglich der Aggregation sowie dem betrachteten Szenar ab. Um im Rahmen der Anwendung des Leitschützenprinzips die beschriebenen Problematik des Informationsverlustes bei pauschalisierter Sichtlinienbestimmung adäquat zu berücksichtigen bzw. beurteilen zu können, sollten unter anderem die folgenden Kriterien stets betrachtet werden:

1. *Zusammensetzung der Gefechtselemente*: Sind in den aggregierten Gefechtselementen nur Einzelsysteme zusammengefasst, welche in einer engeren räumlichen Umgebung disloziert sind, kann normalerweise von einem weitestgehend einheitlichen Sichtbereich für alle Einzelsysteme ausgegangen werden, so dass durch den Aggregationsansatz keine wesentlichen Verfälschungen entstehen können. Werden dagegen in einem Gefechtselement eine besonders große Zahl von Einzelsystemen oder solche Einzelsysteme, welche über einen großen Raum verteilt sind, zusammengefasst, so ist mit dem verstärkten Auftreten des beschriebenen Problems zu rechnen.
2. *Beschaffenheit des abgebildeten Geländes*: Schwieriges Gelände, in welchem aufgrund ständigen Höhenwechsels bzw. aufgrund der vorhandenen Vegetation oder Bebauung nur für sehr kleine Gebiete von einheitlichen Sichtbereichen ausgegangen werden kann, führt offensichtlich dazu, dass der Effekt der Über- bzw. Unterbewer-

tung von Sichtmöglichkeiten häufiger auftreten kann als dies für offenes Gelände der Fall ist.

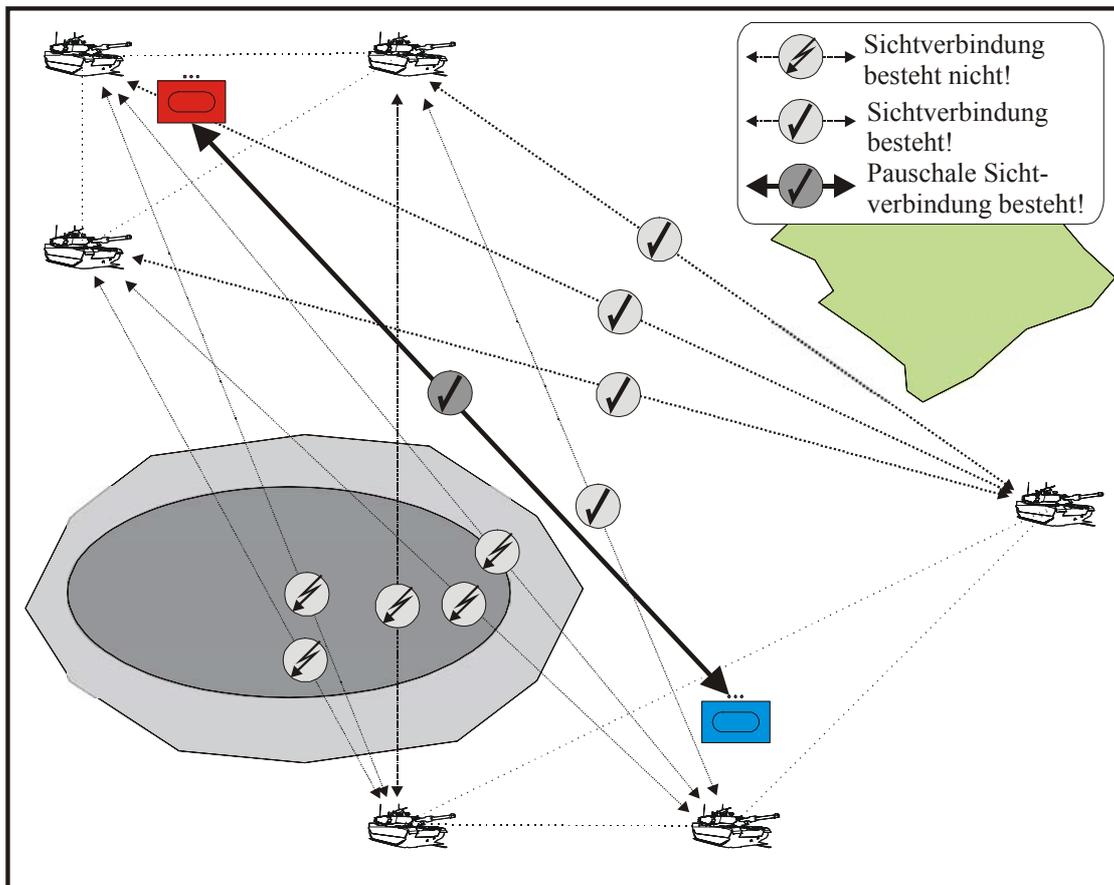


Abbildung 5.7: Problem der Überbewertung von Sichtmöglichkeiten bei pauschaler Sichtlinienbestimmung

Betrachtet man das erste Kriterium mit Blick auf die Anfangs²¹² beschriebene Motivation für die Vorgehensweise beim Leitschützenprinzips, so wird deutlich, dass die konsequente Umsetzung der dort beschriebenen Vorgehensweise ein Auftreten der Sichtbereichsproblematik abschwächen kann. Es wurde dort davon ausgegangen, dass die Zusammenfassung homogener Einzelsysteme in aggregierten Gefechts-elementen und die damit verbundene Beschränkung der Aktionsmöglichkeiten auf diese, moderne militärische Einsatzgrundsätze abbilden soll, welche das geschlossenen Agieren von Infanterieelementen der hierarchischen Ebenen des Trupps bzw. der Gruppe sowie von homogenen Kampffahrzeugen in Zügen vorsehen. Gerade im Fall der Infanterietrupps bzw. -gruppen ist jedoch davon auszugehen, dass die darin zusammengefassten Einzelsysteme, sprich Infanteristen, sich räumlich nicht so weit voneinander entfernen, dass dies zu deutlichen Veränderungen der einzelnen Sichtbereiche führen kann. Im Rahmen der Abbildung eines Infanterietrupps durch ein Gefechts-element der entsprechenden Mächtigkeit ist somit auch nicht mit einer merklichen Über- bzw. Unterbewertung der Sichtmöglichkeiten zu rechnen, so dass eine Verfälschung des abgebildeten Gefechts durch die Aggregation nicht zu erwarten ist. Bei der Abbildung homogener Gefechts-fahrzeugzüge ist dagegen eher davon auszugehen, dass diese auch über größere räumliche Distanzen verteilt sein können, da hier die technischen Möglichkeiten gegeben sind, welche das geschlossene Agieren auch über diese Distanzen hinweg ermöglichen. Hierbei ist somit

²¹² vgl. Kapitel 5.1.1, S. 101f

davon auszugehen, dass bei den Einzelsystemen durchaus unterschiedlich Sichtbereiche vorliegen können.²¹³ Bei einer Abbildung entsprechender Kräfte in einem Gelände, welches aufgrund seiner Beschaffenheit das Auftreten von Über- oder Unterbewertungen der Sichtbereiche aggregierter Gefechtselemente begünstigt, sollte deshalb kritisch geprüft werden, mit welcher Mächtigkeit die am Gefecht beteiligten Kampffahrzeugsysteme in Gefechtselementen zusammengefasst werden. Gegebenenfalls sollte hierbei auf eine Einzelabbildung der Gefechtsfahrzeuge zurückgegriffen werden, wobei die in Kapitel 5.3.2 beschriebene Problematik asymmetrischer Mächtigkeiten korrespondierender Gefechtselemente natürlich berücksichtigt werden muss.

Die Problematik des Informationsverlustes durch pauschalisierte Sichtlinienbestimmung wird in Kapitel 7 im Rahmen einer Reihe von Simulationsläufen untersucht.

²¹³ Generell kann natürlich ebenfalls davon ausgegangen werden, dass Einzelsysteme (auch Gefechtsfahrzeuge) bei schwieriger werdendem Gelände tendenziell näher zusammenrücken, um dadurch die zum geschlossenen Agieren notwendige Führung zu erleichtern bzw. überhaupt erst zu ermöglichen.

5.4 Zusammenfassung

Das Leitschützenprinzip als vorgeschlagener Ansatz zur aggregierten Abbildung elementarer Gefechtsprozesse in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen basiert auf der Zusammenfassung homogener Einzelsysteme in Gefechtselementen mit einer durch den Modellentwickler bzw. Nutzer vorgegebenen Mächtigkeit, d.h. Anzahl an Systemen. Einzelsysteme führen Gefechtsprozesse, wie etwa Aufklärung, Bewegung oder Abnutzung, grundsätzlich zeitgleich und nur noch im Verbund des jeweiligen Gefechtselementes durch, wobei jedoch der individuelle Zustand jedes Systems nach wie vor für die Entscheidung, ob es an der jeweiligen Durchführung teilnehmen kann, betrachtet wird. Für die Abbildung der Durchführung der elementaren Gefechtsprozesse durch die aggregierten Gefechtselemente können im Rahmen des Leitschützenprinzips prinzipiell Modelle und Algorithmen aus Simulationssystemen mit Einzelsystemabbildung übernommen werden, welche gegebenenfalls nur geringfügigen Modifikationen unterzogen werden müssen. Die dafür benötigten hochauflösenden Informationen bezüglich Position, Erleider- oder Schießaktivität, Niederhaltezustand bzw. Bewegungsfähigkeit jedes Einzelsystems bleiben dazu bei den Gefechtselementen erhalten und werden nur um eine geringe Zahl zusätzlicher Informationen erweitert.

Aus der Beschränkung der elementaren Gefechtsprozesse auf die aggregierten Gefechtselemente kann je nach gewähltem Grad der Aggregation (gegeben durch Anzahl und Mächtigkeit der aggregierten Gefechtselemente) sowie eventueller Modifikationen der jeweiligen Modelle offenkundig eine Reduzierung des notwendigen Aufwandes zur Ereignisabbildung und –verwaltung resultieren, welche sich in einem Laufzeitgewinn niederschlägt. Der mit dieser Beschränkung ebenfalls verbundene Verlust an individuellen Handlungsmöglichkeiten der Einzelsysteme sowie eine mögliche Verfälschung der aggregierten Sichtbereichsbestimmung kann jedoch zu einer Verschlechterung der Abbildungsgüte gegenüber der Einzelsystemabbildung führen.

Im Folgenden wird deshalb an Hand des Experimentalsystems SAMBA eine beispielhafte Implementierung des Leitschützenprinzips vorgenommen und anschließend im Rahmen einer großen Anzahl verschiedener Simulationsläufe versucht, den erzielten Rechenzeitgewinn sowie den damit verbundenen Verlust an Abbildungsgüte anhand einer ausgewählten Zahl von Maßgrößen zu bewerten.

6 DAS GEFECHTSSIMULATIONSSYSTEM SAMBA

6.1 Modellbeschreibung

6.1.1 Allgemeines zu SAMBA

Das Modell SAMBA²¹⁴ wurde im Rahmen dieser Arbeit einerseits entwickelt und implementiert, um beispielhaft die Modifikation von hochauflösenden Algorithmen zur Abbildung elementarer Gefechtsprozesse im Leitschützenprinzip für Elemente variabler Mächtigkeit zu demonstrieren. Andererseits soll es als flexible Testumgebung dienen, mit der es möglich ist, mittels unterschiedlicher Szenarien und einer großen Zahl von Simulationsläufen die Güte des vorgestellten Ansatzes zu bewerten. Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung beschränkt sich das Modell vor allem auf die Abbildung reiner Infanteriekräfte in Zug- oder Kompaniestärke während der Sturm- und Einbruchphase eines Gefechts und verzichtet – mit Ausnahme der Abbildung von Zielauswahl, Feuerallokation und Bewegungssteuerung – vollständig auf die Modellierung von Führungsprozessen. Diese Vorgehensweise stellt dabei die generelle Eignung des Leitschützenprinzips zur Abbildung von Zügen homogener Gefechtsfahrzeuge nicht in Frage und erscheint für den quasi-empirischen Nachweis der Effizienz des Verfahrens als ausreichend, da die vorgestellten Algorithmen mit geringfügigen Anpassungen auch bei der Abbildung von Fahrzeugen Verwendung finden können. Auf die Modellierung einer gewissen Zahl von Eigenschaften und Fähigkeiten von Einzelsystemen – welche in modernen hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen üblicherweise Berücksichtigung finden – wird im Rahmen des Modells SAMBA verzichtet, soweit nachvollziehbar ist, dass diese keinen Einfluss auf die Gütebewertung des Leitschützenprinzips besitzen und somit als Problemkonstanten zu bewerten sind.²¹⁵

SAMBA ist konsequent als Schnellläufer ausgelegt und durch den Bediener über eine Anzahl von Datenbanken zu steuern, welche mittels einer ODBC-Schnittstelle²¹⁶ an das Modell angeschlossen sind. Diese Datenbanken enthalten im Einzelnen die untersuchten Szenarien, Objektbeschreibungen, Geländedaten sowie die ermittelten Simulationsergebnisse.

6.1.2 Geländeabbildung

Die Modellierung des Gefechtsfelds in SAMBA orientiert sich an der in COSIMAC-WS-S verwendeten Geländeabbildung²¹⁷, da diese über eine für den geplanten Einsatzzweck des Modells hinreichende Auflösung verfügt. Ferner erlaubt dies die Verwendung der dort bereits vorhandenen digitalisierten Geländedaten und erleichtert somit die Übertragung vorhandener COSIMAC-WS-S-Module zur Sichtlinienbestimmung und Routenberechnung.

Das digitalisierte Gelände in SAMBA wird dementsprechend durch ein gerastertes Zellmodell abgebildet, welches das Gefechtsfeld in quadratische Geländezellen mit einer Kantenlänge von 25m unterteilt. Ein einzelnes Quadrat repräsentiert damit eine Fläche von 625m², welche in Bezug auf ihre beschreibenden Attribute als homogen angenommen wird. Beschreibende Attribute einer Geländezelle in SAMBA sind:

²¹⁴ **S**imple **A**ttention **M**odel for variably **A**ggregated Forces

²¹⁵ Die entsprechenden Eigenschaften bzw. Fähigkeiten werden in der folgenden Modellbeschreibung jedoch zumeist angesprochen und ihre Einstufung als Problemkonstante motiviert.

²¹⁶ **O**pen **D**atabase **C**onnectivity – Schnittstelle: Verbreitete Schnittstelle zur Kommunikation und Manipulation von und mit Datenbanken mittels der Datenbankmanipulationssprache SQL (**S**tructured **Q**uery **L**anguage).

²¹⁷ Eine detaillierte Beschreibung der Geländeabbildung in COSIMAC-WS-S enthält etwa [Hofmann et al. 2000].

- die *UTM-Koordinate des Zellmittelpunktes*²¹⁸,
- die *relative Koordinate der Geländezelle im Zellraster*,
- die *Höhe der Geländezelle* in [dm] über Normalnull (NN),
- die *Transfargeschwindigkeiten* in [m/sec] für die vier Bewegungsrichtungen sowie
- der *Typ des Bewuchses bzw. der Bebauung der Zelle*.

An möglichen Bewuchs- oder Bebauungstypen unterscheidet SAMBA, analog zu COSIMAC-WS-S, zwischen

1. *Wiese* (leichter Boden),
2. *Wiese* (schwerer Boden),
3. *Kusselgelände*,
4. *Ortschaft*,
5. *Wald*²¹⁹
6. *Straße*,
7. *Fluss*,
8. *Brücke* und
9. *Wasser*.

Jedem der genannten Typen wird außerdem eine, für den jeweiligen Kartenausschnitt charakteristische Bewuchs- bzw. Bebauungshöhe zugewiesen. Diese dient in Kombination mit der gegebenen Höhe über NN dazu, die absolute Höhe einer Geländezelle zu bestimmen, welche im Rahmen einer Sichtlinienbestimmung genutzt wird, um über das Vorliegen einer Sichtverbindung zu entscheiden. Die spezifischen Höhen der einzelnen Typen können in unterschiedlichen Kartenausschnitten variieren und erlauben somit die Abbildung regional spezifischer Bewuchs- und Bebauungsarten.

²¹⁸ In SAMBA verwendete UTM-Koordinaten verfügen über eine Genauigkeit von 1x1m, d.h. die Ost-West- und Nord-Süd-Komponenten einer Koordinate sind jeweils vierstellig.

²¹⁹ Auf die in COSIMAC-WS-S vorhandene weitere Unterscheidung von Wald als Panzerhemmnis und Wald als Panzerhindernis wurde in SAMBA verzichtet, da das Modell zur Abbildung reiner Infanteriekräfte gedacht ist.

6.1.3 Abbildung der Gefechtsobjekte

Das Modell SAMBA unterscheidet bei Gefechtsobjekten zwischen

- (a) **Gefechtselementen**, dabei handelt es sich um im Sinne des Leitschützenprinzips aggregierte Elemente, welche jeweils aus einer vorgegebenen Zahl homogener Einzelsysteme (Schützen bzw. Gefechtsfahrzeuge) bestehen, und
- (b) **Gefechtseinheiten**, welche als organisatorische Zusammenfassung einzelner Gefechtselemente dienen und übertragen auf die abgebildete militärische Realität als Gruppen oder Züge interpretiert werden können.

Ein individuelles **Gefechtselement** in SAMBA wird durch eine im Vergleich zu anderen hochauflösenden Gefechtssimulationsmodellen relativ geringe Menge beschreibender Parameter charakterisiert, welche für den beabsichtigten Verwendungszweck des Modells jedoch ausreichend sind. Im Einzelnen handelt es sich bei den beschreibenden Parametern um:

1. *Name* des aggregierten Elements,
2. *Zugehörigkeit* des Elements zu einer der beiden abgebildeten Parteien Blau und Rot,
3. *übergeordnete Gefechtseinheit*, welcher das Element angehört,
4. *Anzahl der homogenen Einzelsysteme*, aus denen sich das aggregierte Element zusammensetzt,
5. *Zustandsvektor der Einzelsysteme*, aus denen sich das aggregierte Element zusammensetzt,
6. *Typ der aggregierten Einzelsysteme*,
7. *Typ des verwendeten Sensorsystems*, welches jedem Einzelsystem zur Aufklärung zugeordnet ist,
8. *minimale Zeitdauer eines Aufklärungsvorgangs*,
9. *Feuerkoordinierungsgrad* und
10. *Deckungsgrad* des Gefechtselements.

Für jedes **Einzelsystem** eines aggregierten Gefechtselements werden in SAMBA dabei die individuellen Zustandskategorien:

- Schaden (mögliche Ausprägungen: intakt oder ausgefallen),
- Schießaktivität (mögliche Ausprägungen: aktiv oder inaktiv),

- Erleideraktivität gegenüber Flachfeuer²²⁰ (mögliche Ausprägungen: aktiv oder inaktiv) sowie
- Niederhaltung (mögliche Ausprägungen: niedergehalten²²¹ oder nicht niedergehalten) unterschieden.

Eine **Gefechtseinheit** schließlich wird in SAMBA vollständig beschrieben durch:

1. *Name* der Einheit,
2. *Zugehörigkeit* der Einheit zu einer der abgebildeten Parteien Blau und Rot und die
3. *Menge der unterstellten Gefechtselemente*.

²²⁰ Eine separate Betrachtung der Erleideraktivität gegenüber Steilfeuer findet in SAMBA nicht statt, da auf die Abbildung entsprechender Waffensysteme bewusst verzichtet wurde. Die Modellierung von Steilfeuerwaffensystemen und ihrer Feuerwirkung kann im Rahmen des Leitschützenprinzips relativ einfach – mit einer gegenüber Einzelsystemmodellen vergleichbaren Genauigkeit – umgesetzt werden (vgl. Anhang A), so dass die Güte des Aggregationsverfahrens dadurch nicht beeinflusst wird.

²²¹ Ein niedergehaltenes Einzelsystem gilt in SAMBA automatisch als nicht schießaktiv sowie nicht erleideraktiv gegenüber Flachfeuer.

6.1.4 Abbildung des Abnutzungsprozesses

6.1.4.1 Gliederung des Abnutzungsprozesses

Die Abbildung der Abnutzungsprozesse zwischen einem feuernden Element (Verursacher) und einem beschossenen Element (Erleider) in SAMBA gliedert sich in die im Folgenden beschriebenen Phasen der

- *Zielaufklärung,*
- *Zielauswahl,*
- *Feuerallokation,*
- *Trefferermittlung* sowie
- *Ermittlung der erzielten Wirkung.*

Nach der abschließenden Phase der Ermittlung der erzielten Wirkung beginnt die Abbildung des Abnutzungsprozesses mit einer weiteren Zielaufklärungsphase erneut. Die automatische Abgabe von einem bzw. mehreren Nachschüssen auf dasselbe Ziel – z.B. zur Vermeidung langer Erstschussrichtzeiten – ist in SAMBA bisher nicht vorgesehen, könnte aber relativ problemlos integriert werden.²²²

6.1.4.2 Zielaufklärung

In dieser Phase wird ermittelt, welche feindlichen Gefechtselemente das Verursacherelement V mit Hilfe seines Sensorsystems entdeckt hat. Die Modellierung geschieht dabei folgendermaßen:²²³

- (1) Aus der Menge $\tilde{F} = \{F_1, F_2, \dots, F_p, \dots, F_{N_r}\}$ aller vorhandenen feindlichen Gefechtselemente wird die Teilmenge $\tilde{F}_{LOS}(V) \subseteq \tilde{F}$ aller Elemente bestimmt, zu denen V eine Sichtverbindung besitzt. Es gilt somit:

$$\tilde{F}_{LOS}(V) := \left\{ F_p \mid F_p \in \tilde{F} \wedge \left(\text{Es existiert eine Sichtlinie zwischen } V \text{ und } F_p \right) \right\} \quad (6.1)$$

Für die Prüfung auf Existenz einer Sichtlinie (Line of Sight) zwischen V und einem gegebenen Element $F_p \in \tilde{F}$ wird ein Geländeschnitt zwischen der Position (x_V, y_V) des

²²² Als problematisch bei der Verwendung automatischer Nachschüsse kann sich die Frage erweisen, ob Nachschüsse von einer Beobachtung der erzielten Trefferwirkung abhängen oder unabhängig davon grundsätzlich in fester (evtl. benutzervorgegebener) Zahl abgegeben werden. Falls eine Beobachtung der Trefferwirkung für die Entscheidung über Nachschüsse ausschlaggebend sein soll, muss diese natürlich adäquat modelliert werden, was jedoch nicht trivial ist. Gerade bei der Bekämpfung von Gefechtsfahrzeugen ist das Beobachten des eigentlichen Treffers meist einfach, das Beobachten der Trefferwirkung dagegen in der Regel schwierig bzw. unmöglich, da diese innerhalb des Fahrzeugs stattfindet und nur wirklich deutliche Reaktionen (Explosionen, Feuer, Rauch, etc.) außerhalb wahrzunehmen sind.

²²³ Für die Wahl der Bezeichnungen (vgl. Kapitel 5.1.2) wird hier angenommen, dass das Verursacherelement der Partei Blau angehört. Für ein rotes Element ist die Vorgehensweise analog.

Verursachers und der Position (x_{F_p}, y_{F_p}) des Erleiders durchgeführt. Im Rahmen dieses Geländeschnittes wird für die Menge $\tilde{Z}_{LOS} = \{z_1, z_2, \dots, z_\mu, \dots, z_{Max}\}$ aller Geländezellen, welche sich auf der direkten Verbindung zwischen (x_V, y_V) und (x_{F_p}, y_{F_p}) befinden, untersucht, ob sie durch den Verursacher überblickt werden können. Ist dies für alle Zellen der Fall, so existiert eine Sichtverbindung.

Die Menge \tilde{Z}_{LOS} der Zellkoordinaten auf dem Verbindungsvektor zwischen (x_V, y_V) und (x_{F_p}, y_{F_p}) bestimmt sich dazu nach

$$\tilde{Z}_{LOS} = \left\{ \left(\left(x_V + \lambda \cdot \frac{\Delta_x}{\kappa}, y_V + \lambda \cdot \frac{\Delta_y}{\kappa} \right) : \lambda = 1, \dots, \kappa \right) \right\} \quad (6.2)$$

wobei

$$\Delta_x = x_{F_p} - x_V \quad (6.3)$$

$$\Delta_y = y_{F_p} - y_V$$

$$\kappa = \begin{cases} \max\{\Delta_x, \Delta_y\} & \text{falls } \Delta_x = 0 \text{ oder } \Delta_y = 0 \\ \text{kgV}(\Delta_x, \Delta_y) & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.4)$$

und

$$\begin{aligned} (x_V, y_V) &= \text{Rasterkoordinate der Geländezelle, auf der sich der Verursacher aufhält} \\ (x_{F_p}, y_{F_p}) &= \text{Rasterkoordinate der Geländezelle, auf der sich der Erleider aufhält} \end{aligned}$$

Ob eine Zellkoordinate $z_\mu \in \tilde{Z}_{LOS}$ mit der Position (x_{Z_μ}, y_{Z_μ}) durch den Verursacher überblickt werden kann, wird gemäß folgender Regel (vgl. Abbildung 6.1) ermittelt:

$$z_\mu \in \tilde{Z}_{LOS} \text{ kann durch V überblickt werden} \Leftrightarrow h(z_\mu) \leq h'(z_\mu)$$

wobei

$$h(z_\mu) = \text{Höhe über NN der zu prüfenden Geländezelle} + \text{zelltypspezifische Bewuchs-/Bebauungshöhe von Zelle } z_\mu$$

und

$$h'(z_\mu) = (h_{F_p} - h_V) \cdot d_{Z_\mu} + h_V \quad (6.5)$$

mit

$$d_{Z_\mu} = \frac{d_{VZ_\mu}}{d_{VF_p}} \quad (6.6)$$

sowie

$$d_{VZ_\mu} = \left| (x_V, y_V) - (x_{Z_\mu}, y_{Z_\mu}) \right| \quad (6.7)$$

$$d_{VF_p} = \left| (x_{F_p}, y_{F_p}) - (x_V, y_V) \right| \quad (6.8)$$

h_{F_p} = Höhe über NN der Geländezelle, auf welcher sich das Element F_p aufhält

h_V = Höhe über NN der Geländezelle, auf welcher sich der Verursacher aufhält,
+ Sensorhöhe des Verursachers

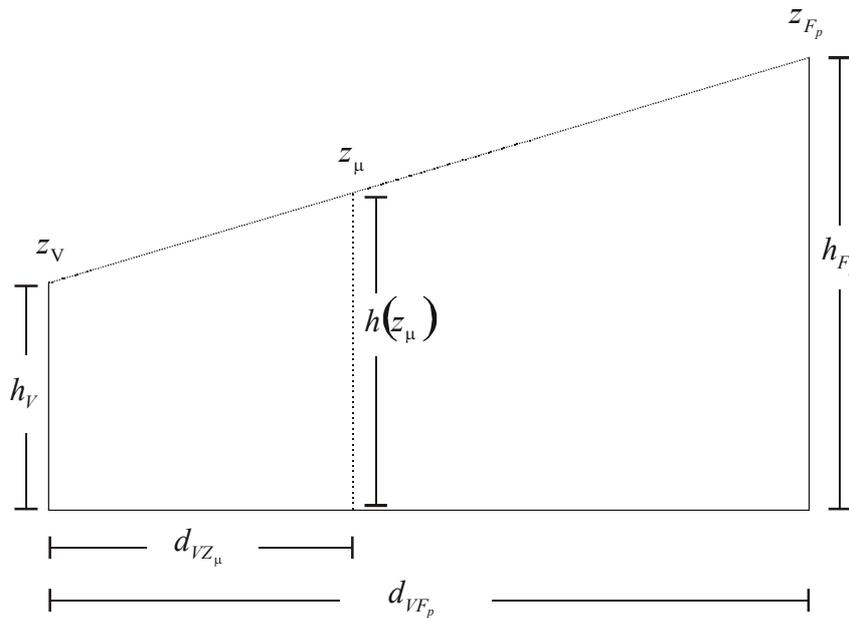


Abbildung 6.1: Verhältnisse bei Überprüfung auf Vorliegen einer Sichtverbindung zwischen der Geländezelle z_V des Verursachers und einer Geländezelle z_{F_p}

- (1) Aus der Menge \tilde{F}_{LOS} wird in einem zweiten Schritt mittels eines Zufallsprozesses die Teilmenge $\tilde{F}_{DISC} \subseteq \tilde{F}_{LOS}$ aller feindlichen Elemente bestimmt, welche durch den Verursacher im Rahmen dieses Aufklärungsvorgangs entdeckt werden. Zu diesem Zweck wird für jedes $F_p \in \tilde{F}_{LOS}$ unter Berücksichtigung des verwendeten Sensortyps, der Entfernung zwischen Element und Verursacher sowie des Typs der Geländezelle z_{F_p} , in der sich das Element aufhält, die Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der dieses Gefechtselement durch den Verursacher entdeckt wird.

Die Ausgangsbasis dieser Berechnung bildet die Grundentdeckungswahrscheinlichkeit p_{Basic} , welche spezifisch ist für die jeweilige Kombination aus verwendetem Sensorsystem, Typ des zu entdeckenden Elements F_p und Bewuchs- bzw. Bebauungstyp der Geländezelle z_{F_p} . p_{Basic} ist für jede mögliche Kombination dieser drei Faktoren in einer

Grunddatenbank gespeichert. Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit p_{Disc} , mit welcher V das Element F_p entdeckt, gelten folgende Annahmen:

- (a) Ermittelt wird zuerst die modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit p_{MOD} (vgl. Abbildung 6.2) anhand der Formel:²²⁴

$$p_{MOD} = \begin{cases} 1 & , \text{für } d \leq d_A(S) \\ p_{Basic} + (1 - p_{Basic}) \cdot \left(1 - \frac{d - d_A(S)}{d_B(S) - d_A(S)}\right) & , \text{für } d_A(S) < d < d_B(S) \\ p_{Basic} & , \text{für } d_B(S) \leq d \leq d_{Max}(S) \\ 0 & , \text{für } d > d_{Max}(S) \end{cases} \quad (6.9)$$

wobei

$$\begin{aligned} d &= \text{Entfernung zwischen Verursacher V und Element } F_p \\ d_A(S) &= \text{für den Sensortyp S spezifische erste Stützentfernung} \\ d_B(S) &= \text{für den Sensortyp S spezifische zweite Stützentfernung} \\ d_{Max}(S) &= \text{maximale Reichweite des Sensortyps S} \end{aligned}$$

p_{MOD} beschreibt also die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Sensor vom Typ S ein einzelnes Waffensystem des gegebenen Typs in der Distanz d in einer bestimmten Suchzeit entdeckt.

- (b) Bewegt sich das zu entdeckende Element, so wird p_{MOD} durch einen Faktor $\Delta_{Move}(S, F_p)$ nach der Formel

$$p'_{MOD} = \min\{p_{MOD} + \Delta_{Move}(S, F_p), 1\} \quad (6.10)$$

zu der Wahrscheinlichkeit p'_{MOD} modifiziert. Der Faktor $\Delta_{Move}(S, F_p)$ ist dabei abhängig von der jeweiligen Kombination aus eingesetztem Sensorsystem S und dem Einzelsystemtyp des Elements F_p .

Diese Modifikation spiegelt die Annahme wider, dass ein bewegtes Objekt durch ein Sensorsystem grundsätzlich leichter zu entdecken ist als ein ruhendes.

²²⁴ Die hier wiedergegebene exemplarische Formel repräsentiert den charakteristischen entfernungsabhängigen Verlauf der Entdeckungswahrscheinlichkeit eines optischen Sensors (z.B. menschliches Auge). Andere Sensortypen (z.B. Radar) verfügen über unterschiedliche Verläufe, werden in SAMBA aber nicht abgebildet, da die genaue Formel zur Berechnung der Entdeckungswahrscheinlichkeit keinen Einfluss auf die Güte des Aggregationsverfahrens hat und somit für die folgenden Untersuchungen ohne Belang ist.

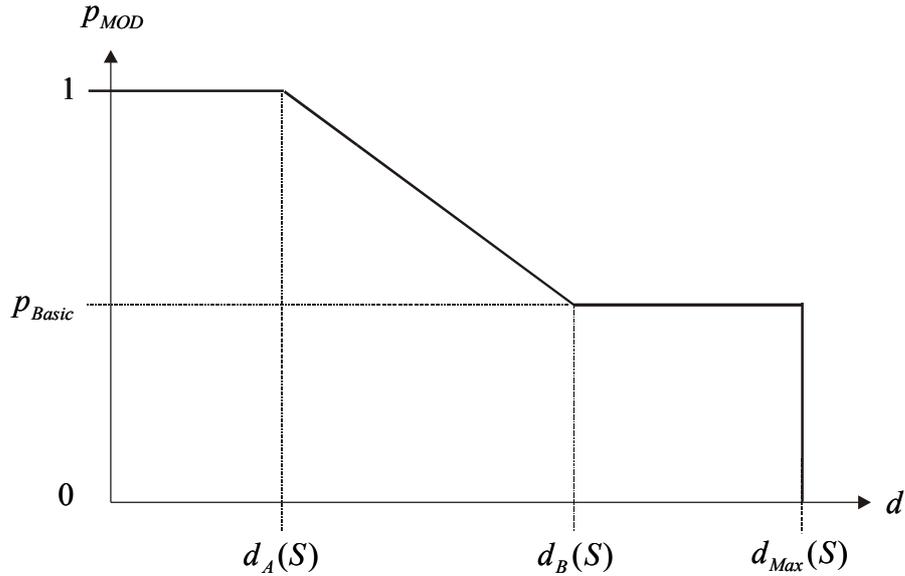


Abbildung 6.2: Verlauf der Wahrscheinlichkeit p_{MOD} in Abhängigkeit der sensorspezifischen Entfernungen d_A , d_B und d_{MAX}

- (c) Ein individuelles Einzelsystem eines aggregierten Gefechtselements F_p gilt in SAMBA durch alle Systeme eines aufklärenden aggregierten Elements V als entdeckt, sobald ein Sensorsystem von V dieses System von F_p entdeckt. Die endgültige Entdeckungswahrscheinlichkeit $p_{Discover}$ für ein Einzelsystem von F_p errechnet sich somit nach

$$p_{Discover} = 1 - (1 - p'_{MOD})^n \quad \forall f_p^e \quad (6.11)$$

wobei

- n = Anzahl homogener Sensorsysteme, welche in dem aggregierten Element V zusammengefasst sind
- f_p^e = Einzelsystem, welches in dem aggregierten Element F_p zusammengefasst ist ($1 \leq e \leq \bar{b}(F_p)$)
- $\bar{b}(F_p)$ = Aktuelle Mächtigkeit des Elements F_p

Für alle $F_p \in \tilde{F}_{LOS}$ wird anhand dieses Schemas nacheinander $p_{Discover}(F_p)$ ermittelt und der Zufallsprozess für jedes intakte und gegenüber Flachfeuer erleideraktive Einzelsystem f_p^e von F_p realisiert. Somit wird für jedes F_p entschieden, welche seiner Einzelsysteme durch V im Verlauf dieses Aufklärungsvorgangs entdeckt wurden.

- (2) Ist ein Einzelsystem f_p^e eines aggregierten Elements F_p durch ein aufklärendes Gefechtselement V entdeckt worden, so wird in folgenden Aufklärungsvorgängen nur noch geprüft, ob immer noch eine Sichtverbindung zwischen F_p und V besteht und das jeweilige Einzelsystem f_p^e noch erleideraktiv gegenüber Flachfeuer ist. Ist dies der Fall, so gilt f_p^e weiterhin als entdeckt und der beschriebene Zufallsprozess wird nur für bisher unent-

deckte bzw. im letzten Aufklärungsvorgang nicht erleideraktive Einzelsysteme von F_p realisiert. Wird die Sichtverbindung zwischen F_p und V unterbrochen, so wird der Entdeckungsprozess im nächsten Aufklärungsvorgang wieder für alle Einzelsystem f_p^e von F_p in der beschriebenen Weise realisiert.

- (3) Der Aufklärungsprozess ist in SAMBA als zeitbehafet modelliert, d.h. ausgehend von einer gegebenen elementspezifischen minimalen Dauer eines Aufklärungsprozesses t_{Scan} und einer einfachen Dreiecksverteilung (vgl. Abbildung 6.3) wird mit Hilfe eines Zufallsprozesses die konkrete Dauer jedes einzelnen Aufklärungsvorgangs bestimmt. Die Element- und Geländedaten, welche der oben beschriebenen Bestimmung des Aufklärungsergebnisses zugrunde liegen, sind jeweils die nach Ablauf der ermittelten Simulationszeit aktuellen Daten.

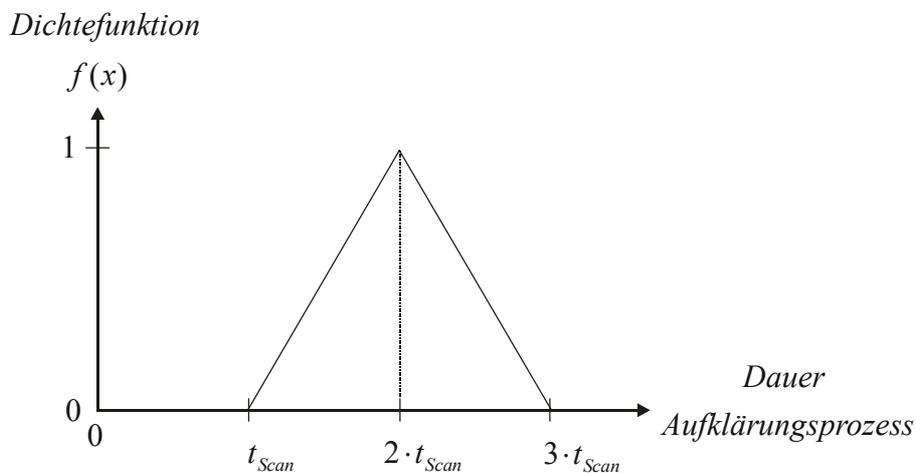


Abbildung 6.3: Bestimmung der Dauer eines Aufklärungsvorgangs mittels einer symmetrischen Dreiecksverteilung (bei minimaler Aufklärungsdauer t_{Scan})

6.1.4.3 Zielauswahl

Im Rahmen der **Zielauswahl** wählt der Verursacher aus der Menge durch ihn aufgeklärter feindlicher Gefechts-elemente das Element $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$, welches in der anschließenden Ab-nutzungsphase bekämpft werden soll. Es gelten dabei die folgenden Entscheidungsregeln:

- (ER1) Bei sonst identischen Attributen wird grundsätzlich das Element $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$ be-kämpft, welches in der kürzesten Distanz zu dem Verursacher positioniert ist.
- (ER2) Bei sonst identischen Attributen wird grundsätzlich das Element $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$ be-kämpft, welches aktuell die größte Zahl aufgeklärter homogener Einzelsysteme in sich zusammenfasst.

(ER3) Bei sonst identischen Attributen wird grundsätzlich das Element $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$ be-
kämpft, welches dem Verursacher durch die übergeordnete Gefechtseinheit als Ziel
zugewiesen wurde.²²⁵

Um diese Entscheidungsregeln in geeigneter Form zu kombinieren, wird eine einfache multi-
dimensionale Nutzwertanalyse durchgeführt. Zu diesem Zweck wird der jeweilige Grad der
Erfüllung der Regeln (ER1) - (ER3) ermittelt, welcher sich bei Auswahl eines Elements
 $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$ ergeben würde und die daraus resultierenden Teilnutzenwerte zur Bewertung
von F_p in einem Gesamtnutzwert $u(F_p)$ zusammengefasst.

(1) In einem ersten Schritt werden die minimale Distanz d_{Min} zwischen dem Verursacher und
allen $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$ sowie die maximale Anzahl entdeckter homogener Einzelsysteme
 \bar{b}_{Max} , welche in einem Element $F_p \in \tilde{F}_{Discover}$ zusammengefasst sind, ermittelt. Es gilt
somit:

$$d_{Min} = \min_{F_p \in \tilde{F}_{Discover}} \{d(V, F_p)\} \quad (6.12)$$

und

$$\bar{b}_{Max} = \max_{F_p \in \tilde{F}_{Discover}} \{\bar{b}_{DISC}(F_p)\} \quad (6.13)$$

wobei

$$\begin{aligned} d(V, F_p) &= \text{Distanz zwischen dem Verursacher V und dem Element } F_p \\ \bar{b}_{DISC}(F_p) &= \text{Anzahl der durch V aufgeklärten homogenen Einzelsysteme von } F_p \end{aligned}$$

(2) Ausgehend von einer paarweisen Nutzenunabhängigkeit ermittelt sich der Gesamtnutz-
wert $u(F_p)$ auf Basis der Teilnutzenwerte mit Hilfe der Formel:

$$u(F_p) = \begin{cases} \alpha \cdot u_1(F_p) + \beta \cdot u_2(F_p) + \mu \cdot u_3(F_p), & \text{Ziel } F_p \text{ durch übergeordnete} \\ & \text{Einheit zugewiesen} \\ \alpha \cdot u_1(F_p) + \beta \cdot u_2(F_p) & , \text{sonst} \end{cases} \quad (6.14)$$

wobei

$$\begin{aligned} u_1(F_p) &= \text{Teilnutzenwert, welcher dem Element } F_p \text{ aufgrund des Grads der} \\ &\quad \text{Erfüllung von (ER1) zugewiesen wird} \\ u_2(F_p) &= \text{Teilnutzenwert, welcher dem Element } F_p \text{ aufgrund des Grads der Er-} \\ &\quad \text{füllung von (ER2) zugewiesen wird} \\ u_3(F_p) &= \text{Teilnutzenwert, welcher dem Element } F_p \text{ aufgrund des Grads der} \end{aligned}$$

²²⁵ Eine übergeordnete Gefechtseinheit kann ihren unterstellten Elementen Ziele zuweisen, dies ist jedoch nicht
obligatorisch, so dass ein einzelnes Gefechtsselement nicht stets über ein zugewiesenes Ziel verfügt.

Erfüllung von (ER3) zugewiesen wird

α = positiver Gewichtungsfaktor des Teilnutzenwertes $u_1(F_p)$ ($0 \leq \alpha \leq 1$)

β = positiver Gewichtungsfaktor des Teilnutzenwertes $u_2(F_p)$ ($0 \leq \beta \leq 1$)

γ = positiver Gewichtungsfaktor des Teilnutzenwertes $u_3(F_p)$ ($0 \leq \gamma \leq 1$)

und

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (6.15)$$

Die Gewichtungsfaktoren α, β, γ repräsentieren den spezifischen Wert, welchen das jeweilige Gefechtselement V auf die Einhaltung der korrespondierenden Entscheidungsregel legt. Es handelt sich bei ihnen um benutzerdefinierte Eingabedaten, welche im Rahmen der Szenarbeschreibung für jedes abgebildete Gefechtselement individuell festgelegt werden können.

Für die Bestimmung des Teilnutzenwertes $u_1(F_p)$ wird angenommen, dass $u_1(F_p) = 1$ ist, falls $d(V, F_p)$ der ermittelten minimalen Entfernung d_{Min} entspricht. Für größere Entfernungswerte $d(V, F_p)$ errechnet sich der Teilnutzenwert $u_1(F_p)$ gemäß:

$$u_1(F_p) = \frac{d_{Min}}{d(V, F_p)} \quad (6.16)$$

Für die Bestimmung des Teilnutzenwertes $u_2(F_p)$ gelten analoge Annahmen. Entspricht $\bar{b}_{DISC}(F_p)$ der ermittelten maximalen Zahl in einem Element zusammengefasster Einzelsysteme \bar{b}_{Max} , so gilt $u_2(F_p) = 1$. Für kleinere $\bar{b}_{DISC}(F_p)$ errechnet sich $u_2(F_p)$ nach:²²⁶

$$u_2(F_p) = \frac{\bar{b}_{DISC}(F_p)}{\bar{b}_{Max}} \quad (6.17)$$

Die Bestimmung des Teilnutzenwertes $u_3(F_p)$ geschieht bei vorliegender Zielzuweisung durch die übergeordnete Gefechtseinheit nach folgender einfacher Regel:

$$u_3(F_p) = \begin{cases} 1, & \text{falls } F_p = \text{zugewiesenes Ziel} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.18)$$

Liegt kein zugewiesenes Ziel vor, so wird auf die Bestimmung von $u_3(F_p)$ verzichtet.

²²⁶ Die hier gegebene Formel gilt nur exemplarisch für den Fall des Vorliegens eines homogenen Zielspektrums, d.h. alle entdeckten feindlichen Gefechtselemente bestehen aus Einzelsystemen desselben Typs. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, so müssen unterschiedliche Einzelsystemtypen durch Bekämpfungsprioritäten etwa der Form „Bekämpfung eines Panzers hat die gleiche Priorität wie die Bekämpfung von 10 Infanteristen“ vergleichbar gemacht werden. (ER2) kann danach auf die mit den Prioritäten gewichteten Einzelsystemzahlen der Elemente angewendet werden.

- (3) Für die Bekämpfung als Erleidererelement ausgewählt wird dann das Element E , welches über den maximalen Nutzen $u(E)$ aller Elemente $F_p \in \tilde{F}_{Dis\,cov\,er}$ verfügt. Es gilt also:

$$E \in \tilde{F}_{Dis\,cov\,er} : u(E) = \max_{F_p \in \tilde{F}_{Dis\,cov\,er}} \{u(F_p)\} \quad (6.19)$$

Existieren mehrere solcher Elemente mit identischem Gesamtnutzwert, wird zwischen ihnen eine Zufallsauswahl getroffen.

Zur Illustration des verwendeten Zielauswahlalgorithmus betrachte man abschließend das folgende einfache Beispiel (vgl. Abbildung 6.4):

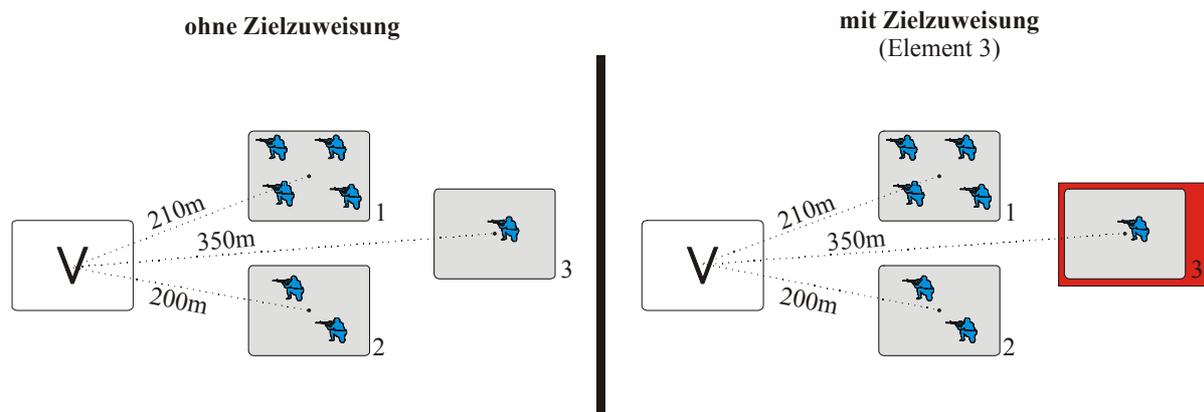


Abbildung 6.4: Beispiellage zur Zielauswahl in SAMBA

Ein Verursacher V hat drei feindliche Gefechtselemente (1-3) mit vier, zwei bzw. einem homogenen Einzelsystem aufgeklärt. Diese Elemente befinden sich in einer Entfernung von 210m, 200m und 350m von V . Es gilt also $d_{Min} = 200m$ sowie $\bar{b}_{Max} = 4$ und damit $u_1(1) \approx 0,95$, $u_1(2) = 1$, $u_1(3) \approx 0,57$ sowie $u_2(1) = 1$, $u_2(2) = 0,5$, $u_2(3) = 0,25$. Mit $\alpha = 0,3$, $\beta = 0,1$, $\gamma = 0,6$ und keiner Zielzuweisung durch die übergeordnete Gefechtsinheit ergeben sich die jeweiligen Gesamtnutzwerte zu $u(1) \approx 0,385$, $u(2) \approx 0,35$ und $u(3) \approx 0,196$, d.h. V würde Element 1 zur Bekämpfung auswählen. Wird V durch die übergeordnete Gefechtsinheit das Ziel 3 für die Bekämpfung zugewiesen, ergibt sich zusätzlich $u_3(1) = 0$, $u_3(2) = 0$, $u_3(3) = 1$ und damit als neue Gesamtnutzwerte $u(1) \approx 0,385$, $u(2) \approx 0,35$ und $u(3) \approx 0,796$. In diesem Fall würde also Gefechtselement 3 zur Bekämpfung ausgewählt.

Bei der Betrachtung des Beispiels bleibt festzuhalten, dass im zweiten Fall das zugewiesene Gefechtselement durch den Verursacher zur Bekämpfung ausgewählt wurde. Diese scheinbar selbstverständliche Tatsache resultiert im verwendeten Zielauswahlalgorithmus jedoch primär aus der Wahl der Gewichtungsfaktoren der Teilnutzenwerte. Würden in obigem Beispiel die Gewichtungsfaktoren α und γ ihre Werte tauschen, ergäben sich neue Gesamtnutzwerte $u(1) \approx 0,67$, $u(2) \approx 0,65$ und $u(3) \approx 0,66$, d.h. auch bei Vorliegen der Zielzuweisung würde V das Gefechtselement 1 zur Bekämpfung auswählen. Die Zielzuweisung an ein Gefechtselement stellt somit in SAMBA keine absolute Handlungsanordnung dar, sondern wird vielmehr durch den Verursacher in sinnvoller Form lageabhängig in die Entscheidung mit einbezogen. Welche Priorität dabei einer Zielzuweisung beigemessen wird, entscheidet der Benutzer durch Eingabe der Gewichtungsfaktoren.

6.1.4.4 Feuerallokation

Bei dem Verursacher V und dem zur Bekämpfung ausgewählten Erleiderelement E handelt es sich um im Sinne des Leitschützenprinzips aggregierte Elemente, d.h. in ihnen ist jeweils eine vorgegebene Zahl homogener Einzelsysteme zusammengefasst. Um zu bestimmen, welches Einzelsystem des Verursachers auf welches Einzelsystem des Erleiders feuert, findet innerhalb der schießaktiven Einzelsysteme von V eine Feuerallokation über das Spektrum der erleideraktiven Einzelsysteme von E statt.²²⁷ Hierbei müssen gegebenenfalls auftretende Doppelbekämpfungen erkannt werden. Mit:

$$\begin{aligned} \Omega(V) &= \text{Feuerkoordinierungsgrad des Verursachers } (0 \leq \Omega \leq 1) \\ \{v^1, v^2, \dots, v^{\bar{a}(V)}\} &= \text{Menge der schießaktiven Einzelsysteme des Verursachers} \\ \{e^1, e^2, \dots, e^{\bar{b}_{DISC}(E)}\} &= \text{Menge der aufgeklärten erleideraktiven Einzelsysteme des Erleiders} \\ \bar{a}(V) &= \text{Anzahl schießaktiver Einzelsysteme des Elements V} \\ \bar{b}_{DISC}(E) &= \text{Anzahl der durch V aufgeklärten erleideraktiven Einzelsysteme von E} \end{aligned}$$

können folgende Fälle (vgl. Abbildung 6.5) im Rahmen der Feuerallokation unterschieden werden:

(1) *Perfekte Feuerkoordinierung und großes Zielspektrum:* $(\Omega = 1) \wedge (\bar{a}(V) \leq \bar{b}_{DISC}(E))$

Die Feuerallokation erfolgt dann nach dem starren Schema:

- $v^1 \rightarrow e^1, v^2 \rightarrow e^2, \dots, v^{\bar{a}(V)} \rightarrow e^{\bar{a}(V)}$
- $e^{\bar{a}(V)+1}, \dots, e^{\bar{b}_{DISC}(E)}$ bleiben unbekämpft.

Doppelbekämpfungen treten in diesem Fall nicht auf.

(2) *Perfekte Feuerkoordinierung und kleines Zielspektrum:* $(\Omega = 1) \wedge (\bar{a}(V) \geq \bar{b}_{DISC}(E))$

Die Feuerallokation erfolgt nach dem starren Schema:

- $v^1 \rightarrow e^1, v^2 \rightarrow e^2, \dots, v^{\bar{b}_{DISC}(E)} \rightarrow e^{\bar{b}_{DISC}(E)}$ und
- $v^{\bar{b}_{DISC}(E)+1} \rightarrow e^1, v^{\bar{b}_{DISC}(E)+2} \rightarrow e^2, \dots, v^{\bar{a}(V)} \rightarrow v^{(\bar{a}(V)-\bar{b}_{DISC}(E))}$

Für $\bar{a}(V) \geq 2 \cdot \bar{b}_{DISC}(E)$ wird der erste Teil des Schemas analog solange wiederholt, bis die verbleibende Zahl noch nicht zugeordneter schießaktiver Einzelsysteme von V kleiner gleich $\bar{b}_{DISC}(E)$ ist.

In diesem Fall kommt es gewollt zu $\bar{a}(V) - \bar{b}_{DISC}(E)$ Doppelbekämpfungen.

²²⁷ Als schießaktiv gelten in SAMBA alle Einzelsysteme eines Gefechtselements, welche nicht ausgefallen bzw. niedergehalten sind.

(3) *Keine Feuerkoordinierung, rein zufällige Feuerverteilung: $\Omega = 0$*

Seien $x_1, \dots, x_{\bar{a}(V)}$ $Gl(1;1; \bar{b}_{DISC}(E)-1)$ -verteilte²²⁸ Zufallszahlen. Dann erfolgt die Zielzuweisung nach folgendem Schema:

- $v^1 \rightarrow e^{x_1}, v^2 \rightarrow e^{x_2}, \dots, v^{\bar{a}(V)} \rightarrow e^{\bar{a}(V)}$

(4) *Mischform der Feuerkoordinierung (mehr oder weniger koordinierte Zielverteilung, z.B. abhängig vom Ausbildungsgrad, der Phase des Gefechts, etc.): $0 < \Omega < 1$*

Mit $g = \text{round}(\Omega \cdot \bar{a}(V))$ als die gerundete Zahl der koordiniert feuernden Einzelsysteme des Verursachers, wird folgende Vorgehensweise gewählt:

- Für v^1, \dots, v^g wird analog zu Fall 1 ($g \leq \bar{b}_{DISC}(E)$) bzw. Fall 2 ($g \geq \bar{b}_{DISC}(E)$) verfahren.
- Für $v^{g+1}, \dots, v^{\bar{a}(V)}$ wird analog zu Fall 3 verfahren, wobei auch hier $Gl(1;1; \bar{b}_{DISC}(E)-1)$ -verteilte Zufallszahlen verwendet werden.

Das Ergebnis der Feuerallokation ist der Feuerallokationsvektor

$$\overrightarrow{FA}(\Omega(V), E) = (S'_1, S'_2, \dots, S'_{\bar{b}_{DISC}(E)}) \quad (6.20)$$

mit

$$S'_\sigma = \{v^\omega \in \{v^1, v^2, \dots, v^{\bar{a}(V)}\} : v^\omega \text{ feuert auf } e^\sigma \in \{e^1, e^2, \dots, e^{\bar{b}_{DISC}(E)}\}\} \quad (6.21)$$

wobei offensichtlich gelten muss

$$S'_1 \cup S'_2 \cup \dots \cup S'_{\bar{b}_{DISC}(E)} = \{v^1, v^2, \dots, v^{\bar{a}(V)}\} \quad (6.22)$$

und

$$S'_\sigma \cap S'_\rho = \{\} \quad \forall \sigma, \rho \in \{1, \dots, \bar{b}_{DISC}(E)\}, \quad (6.23)$$

d.h. jedes schießaktive Einzelsystem des Verursachers V bekämpft genau ein erleideraktives Einzelsystem des Erleiders E.

²²⁸ Als $Gl(a;b;L)$ -verteilt bezeichnet man eine Zufallsvariable X, bei deren Wahrscheinlichkeitsfunktion es sich um eine diskrete Gleichverteilung mit den Parametern a, b, L handelt (vgl. etwa [Rinne 95], S. 321).

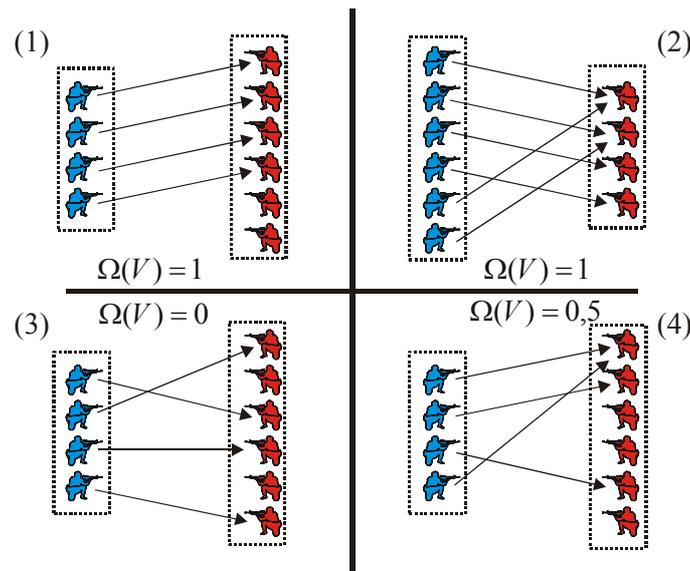


Abbildung 6.5: Vier Grundfälle der Feuerallokation in SAMBA in Abhängigkeit des gegebenen Feuerkoordinierungsgrads und der relativen Größe des Zielspektrums

6.1.4.5 Trefferermittlung

Im Rahmen der Trefferermittlungsphase wird die Abgabe der Schüsse durch die schießaktiven Einzelsysteme des Verursachers simuliert und die Zahl der erzielten Treffer bestimmt. Ausgehend von dem ermittelten Feuerallokationsvektor $\vec{FA}(\Omega(V), E)$ wird dabei errechnet, wie oft jedes aufgeklärte und erleideraktive Einzelsystem von E im Rahmen dieses Bekämpfungsvorgangs getroffen wurde.

- (1) Jedem Einzelsystemtyp in SAMBA ist ein spezifisches Waffensystem²²⁹ zugeordnet, welches über eine entfernungsunabhängige absolute Treffwahrscheinlichkeit p_{hit} verfügt.²³⁰ Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Waffensystem des gegebenen Typs ein ungedecktes²³¹ Einzelsystem des Typs E trifft. Da es sich bei allen abgebildeten Einzelsystemen in SAMBA um Infanteriekräfte handelt, wurde auf eine zieltypabhängige Differenzierung von p_{hit} verzichtet. Daneben verfügt jeder Erleider über einen spezifischen Deckungsgrad $c(E)$ mit $0 \leq c(E) \leq 1$, der angibt, welcher Anteil der maximal möglichen Zielfläche eines Erleidereinzelsystems gedeckt und damit gegenüber

²²⁹ Bei der Verwendung des Leitschützenprinzips zur Abbildung von Gefechtsfahrzeugen ist es auch denkbar, dass einem Einzelsystem mehrere verschiedene Waffensysteme (Bordkanone, Panzerabwehr-Lenkflugkörper, Flugabwehr-MG, etc.) zugeordnet sind. Ist dies der Fall, so muss unterschieden werden, ob diese Waffensysteme zeitparallel oder jeweils nur -sequentiell eingesetzt werden können. Bei parallelem Einsatz können die hier vorgestellten Algorithmen für jedes Waffensystem individuell genutzt werden, d.h. für jedes Waffensystem findet eine eigene Zielauswahl, Feuerallokation und Trefferermittlung statt. Können die Waffensysteme dagegen nur zeitsequentiell eingesetzt werden, so muss in der Phase der Zielauswahl der Algorithmus geeignet verändert werden, um die Wirkungsfähigkeit des eigenen Waffensystemspektrums zu erfassen und eine Auswahl des verwendeten Waffensystems durchzuführen. Mit Hilfe einer weiteren Entscheidungsregel sollte somit auch danach ausgewählt werden, welches Ziel mit der höchsten Wirkwahrscheinlichkeit bekämpft werden kann.

²³⁰ Auf eine detailliertere entfernungsabhängige Modellierung der Treffwahrscheinlichkeit, wie etwa in BASIS (vgl. [Hofmann et al. 86]), wurde in SAMBA im Hinblick auf den geplanten Verwendungszweck des Modells verzichtet, da alle aggregierten Gefechtselemente – unabhängig von ihrer jeweiligen Mächtigkeit – die gleiche Methode zur Trefferermittlung nutzen und daraus somit keine Unterschiede in den Simulationsergebnissen resultieren können.

²³¹ „Ungedeckt“ bedeutet hier, dass 100% der Zielfläche des Waffensystems sichtbar und damit gegen Flachfeuer verwundbar ist.

Flachfeuer geschützt ist. Ein $c(E) = 0$ beschreibt somit einen ungedeckten, ein $c(E) = 1$ einen gegenüber Flachfeuer vollgedeckten Erleider.

- (2) Aus p_{hit} und $c(E)$ lässt sich für jede Duellpaarung die modifizierte Wahrscheinlichkeit p'_{hit} ermitteln, mit der ein Waffensystem des Verursachers ein Einzelsystem des Erleiders trifft, welches über den Deckungsgrad $c(E)$ verfügt. Diese Wahrscheinlichkeit errechnet sich nach:

$$p'_{hit} = p_{hit} \cdot (1 - c(E)) \quad (6.24)$$

- (3) Für jedes schießaktive Einzelsystem $v_\sigma \in S'_\sigma$ wird mit Hilfe der Treffwahrscheinlichkeit p'_{hit} und einer $Re(0;1)$ -verteilten²³² Zufallszahl entschieden, ob es das Einzelsystem e^σ des Erleiders getroffen hat, welches gemäß dem Eintrag im Feuerallokationsvektor $\vec{FA}(\Omega(V), E)$ von ihm beschossen wird. Ist dies der Fall so gilt:

$$h_{e^\sigma} = h_{e^\sigma} + 1, \quad (6.25)$$

d.h. die Zahl h_{e^σ} der Treffer, welche bei dem Einzelsystem e^σ durch Systeme von V erzielt wurden, erhöht sich um eins.

- (4) Handelt es sich bei einem Schuss nicht um einen Treffer, so wird dieser nicht weiter betrachtet. Ungewollte Treffer auf benachbarte Einzelsysteme werden in SAMBA bisher nicht berücksichtigt.
- (5) Nach Betrachtung aller schießaktiven Einzelsysteme des Verursachers werden die ermittelten Trefferzahlen h_{e^σ} ($1 \leq \sigma \leq \bar{b}_{DISC}(E)$) in einem Treffervektor zusammengefasst:

$$\vec{T}(\vec{FA}(\Omega(V), E)) = (h_{e^1}, h_{e^2}, \dots, h_{e^{\bar{b}_{DISC}(E)}}) \quad (6.26)$$

- (6) Die Schussabgabe wird in SAMBA als zeitbehaftet modelliert. Jeder Waffensystemtyp verfügt dazu über eine spezifische minimale Richtzeit t_{Aim} . Ausgehend von einer einfachen Dreiecksverteilung²³³ wird mit Hilfe eines Zufallsprozesses analog zu der bereits beschriebenen Bestimmung der Dauer eines Aufklärungsprozesses (vgl. Abbildung 6.3) die Simulationszeit ermittelt, welche vergeht, bevor die Waffensysteme des Verursacher ihre Schüsse auf den Erleider abgeben. Auf eine Modellierung der entfernungsabhängigen Flugzeit der Geschosse wird in SAMBA verzichtet, da diese gegenüber anderen abgebildeten Zeiten, wie etwa der Dauer der Aufklärungs- oder Richtvorgänge, vernachlässigbar kurz sind.²³⁴

²³² Als $Re(0;1)$ -verteilt bezeichnet man eine Zufallsvariable, welche in den Grenzen 0 und 1 stetig gleich- oder rechtecksverteilt ist.

²³³ Die hier verwendete symmetrische Dreiecksverteilung ist – genau wie im Fall der Dauer des Aufklärungsprozesses – nur als exemplarisch zu verstehen. In wirklichen Gefechtssimulationsmodellen könnten selbstverständlich auch asymmetrische bzw. beliebige andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen Verwendung finden.

²³⁴ Dies resultiert daraus, dass das abgebildete Infanteriegefecht über zumeist kurze bis mittlere Entfernungen (<100m bis 400m) geführt wird und es sich bei den verwendeten Infanteriewaffensysteme um Systeme mit hoher Mündungsgeschwindigkeit und somit geringer Geschossflugzeit handelt.

6.1.4.6 Ermittlung der erzielten Wirkung

Im Anschluss an die Trefferermittlung wird in der letzten Phase des Abnutzungsprozesses die bei den getroffenen Einzelsystemen des Erleiders erzielte Wirkung abgebildet.

- (2) SAMBA unterscheidet bei der möglichen Wirkung eines Treffers nur zwischen den Ausprägungen „Ausgefallen“ und „Niedergehalten“. Auf eine detailliertere Abbildung²³⁵ wird im Hinblick auf den exemplarischen Charakter von SAMBA verzichtet. Bei einer Verwendung des Leitschützenprinzips in wirklichen Gefechtssimulationssystemen könnte eine solche Unterscheidung besonders zur Modellierung von Gefechtsfahrzeugen jedoch leicht integriert werden.
- (3) Jeder Verursacherwaffensystemtyp verfügt über eine spezifische bedingte Wirkwahrscheinlichkeit $p_{kill|hit}$, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der im Falle eines Treffers die Wirkung bei dem getroffenen Erleidersystem die Ausprägung „Ausgefallen“ annimmt. Im Hinblick auf den bereits angesprochenen reinen Infanteriecharakter des abgebildeten Gefechts wurde auch hier auf eine zieltypabhängige Differenzierung von $p_{kill|hit}$ verzichtet.
- (4) Für alle erleideraktiven Einzelsysteme $e^\sigma \in \{e^1, e^2, \dots, e^{\bar{b}_{DISC}(E)}\}$ wird nun jeweils die Wahrscheinlichkeit $p_{Survive}(h_{e^\sigma})$ ermittelt, mit welcher es die erzielten Treffer überlebt, d.h. nicht in den Zustand „Ausgefallen“ übergeht.²³⁶ $p_{Survive}(h_{e^\sigma})$ errechnet sich dazu aus gegebener Wirkwahrscheinlichkeit und Trefferanzahl h_{e^σ} nach:

$$p_{Survive}(h_{e^\sigma}) = (1 - p_{kill|hit})^{h_{e^\sigma}} \quad (6.27)$$

- (5) Mit Hilfe einer $Re(0;1)$ -verteilten Zufallszahl wird anschließend der Zufallsprozess realisiert und damit entschieden, welche Einzelsysteme $e^\sigma \in \{e^1, e^2, \dots, e^{\bar{b}_{DISC}(E)}\}$ des Erleiders ausgefallen sind.
- (6) Fällt ein Einzelsystem durch die erzielten Treffer nicht aus, so geht es für einen zufällig bestimmten Zeitraum automatisch in den Zustand „Niedergehalten“ über, d.h. es ist in dieser Zeit weder „Schießaktiv“ noch „Erleideraktiv gegenüber Flachfeuer“. Die genaue Niederhaltungsdauer wird ausgehend von einer minimalen Niederhaltezeit $t_{SUPPRESS}$, welche für die jeweilige Kombination aus Verursacherwaffensystem und Erleidersystemtyp spezifisch ist, wiederum mit Hilfe einer einfachen Dreiecksverteilung für jedes Einzelsystem individuell bestimmt.²³⁷

²³⁵ z.B. durch eine Unterscheidung zwischen „Ausfall der Bewegungsfähigkeit“ (engl.: Mobility-Kill), „Ausfall der Fähigkeit zum Waffeneinsatz“ (engl.: Firepower-Kill) oder „Totalausfall“ (engl.: Catastrophic-Kill)

²³⁶ Die Untersuchung, ob ein Einzelsystem durch einen Treffer ausgefallen ist, macht auch für die Abbildung von Infanteriekräften Sinn. Denkbar wäre es zum Beispiel, damit asymmetrische Gefechte zwischen modernen Infanteriekräften mit Körperpanzerung und solchen ohne diese abzubilden. Für Infanteriekräfte ohne Körperschutz kann dann die Überlebenschance als null angenommen werden, für Kräfte mit Körperpanzerung kann die Wahrscheinlichkeit das jeweilige Schutzniveau repräsentieren.

²³⁷ Dies bedeutet insbesondere, dass Einzelsysteme eines Gefechtselementes durch den Beschuss eines feindlichen Elements unterschiedlich lange niedergehalten werden können.

6.1.5 Abbildung der Bewegung von Gefechtselementen

6.1.5.1 Berechnung des optimalen Weges

Jedem Gefechtselement kann in der Beschreibung eines Szenars ein Angriffsziel in Form einer UTM-Koordinate zugewiesen werden. Zu Beginn eines Simulationslaufs wird für diese Gefechtselemente mit Hilfe des im Folgenden beschriebenen Bewegungsalgorithmus ein möglichst schneller Weg²³⁸ von der gegebenen Startkoordinate zu dem gewünschten Angriffsziel berechnet. Das jeweilige Gefechtselement bewegt sich entlang dieses berechneten Weges mit der – aufgrund des jeweiligen Geländetyps und seiner elementspezifischen Höchstgeschwindigkeiten – möglichen Maximalgeschwindigkeit, bis es die Zielkoordinate erreicht hat oder sein letztes Einzelsystem ausgefallen ist. Gefechtselemente in SAMBA sind dabei in der Lage, während einer Bewegung gleichzeitig Aufklärungs- und Abnutzungsvorgänge durchzuführen.

Für die Berechnung des gesuchten Weges von der Startkoordinate utm_s zu der gegebenen Zielkoordinate utm_z wird eine als A*-Algorithmus²³⁹ bezeichnete Variante des Branch-and-Bound-Algorithmus²⁴⁰ verwendet.

Beginnend mit der Startkoordinate utm_s verfährt der Algorithmus dabei folgendermaßen:

- (1) Zu einer betrachteten Geländezelle gz_{utm} sei der bislang ermittelte beste Teilweg bekannt, auf welchem das Element B diese Zelle von der Startkoordinate utm_s aus erreichen kann sowie die dazu benötigte Zeit $t(gz_{utm}, utm_s)$. Im Fall der Koordinate utm_s und der zugehörigen Geländezelle, handelt es sich bei diesem Weg offensichtlich um eine leere Menge von Wegpunkten und es gilt $t(utm_s, utm_s) = 0$.
- (2) In den Hauptrichtungen Nord, Ost, Süd und West werden dann die vier direkten Nachbarzellen der durch die aktuell betrachtete UTM-Koordinate bezeichneten Geländezelle gz_{utm} bestimmt.
- (3) Für jede dieser vier Nachbarzellen – mit Ausnahme der Zelle, welche als letzter Wegpunkt vor gz_{utm} in dem bereits bestimmten besten Teilweg enthalten ist²⁴¹ – werden anschließend die folgenden beiden Werte berechnet:

$$value(gz_{\mu}, gz_{utm}) = \frac{d(gz_{\mu}, gz_{utm})}{V_{Max}(B, gz_{\mu})} \quad (6.28)$$

²³⁸ Auf die Bezeichnung „zeitoptimal“ wird an dieser Stelle bewusst verzichtet, da im Folgenden gezeigt wird, dass der verwendete Algorithmus in der vorgestellten Form nur ein Näherungsverfahren darstellt.

²³⁹ Der A*-Algorithmus verändert den bekannten Branch-and-Bound Algorithmus durch Einführung einer Funktion, welche die zu erwartenden Kosten des jeweiligen Restweges abschätzt. Diese Vorgehensweise führt zu einer – gegenüber dem herkömmlichen Branch-and-Bound Algorithmus – zielgerichteteren Wegsuche innerhalb eines Wegenetzwerkes. Eine detaillierte Diskussion des A*-Algorithmus enthält z.B. [Nilsson 82]

²⁴⁰ vgl. etwa [Hillier, Liebermann 88], S. 397ff

²⁴¹ Mit Ausnahme der Startkoordinate kann jede im Verlauf des Algorithmus betrachtete Koordinate nur durch Übergang aus einer Nachbarzelle erreicht worden sein. Eine Betrachtung dieser Nachbarzelle würde somit einen unnötigen Rückschritt bedeuten.

sowie

$$\text{bound}(gz_{\mu}, gz_{Ziel}) = \frac{d(gz_{\mu}, gz_{Ziel})}{V_{MaxAbs}(B)} \quad (6.29)$$

wobei

$$\begin{aligned} gz_{utm} &= \text{aktuell durch den Algorithmus betrachtete Geländezelle} \\ gz_{\mu} &= \text{Nachbarzelle der Geländezelle } gz_{utm} \quad (gz_{\mu} \in \{gz_N, gz_O, gz_S, gz_W\}) \\ d(gz_{\mu}, gz_{utm}) &= \text{Distanz zwischen Mittelpunkt der betrachteten Geländezelle } \\ &\quad gz_{utm} \text{ und Mittelpunkt der Nachbarzelle } gz_{\mu} \\ d(gz_{\mu}, gz_{Ziel}) &= \text{Distanz zwischen Mittelpunkt der Nachbarzelle } gz_{\mu} \text{ und Zielge-} \\ &\quad \text{ländezelle } gz_{Ziel} \\ V_{Max}(B, gz_{\mu}) &= \text{Aufgrund der element- und zellspezifischen Daten mögliche} \\ &\quad \text{Höchstgeschwindigkeit, mit welcher das Element B sich aus der} \\ &\quad \text{Zelle } gz_{utm} \text{ in die Zelle } gz_{\mu} \text{ bewegen kann} \\ V_{MaxAbs}(B) &= \text{Absolute Höchstgeschwindigkeit des Elements B} \end{aligned}$$

(4) Als nächstes wird für alle Nachbarzellen gz_{μ} geprüft, ob im bisherigen Verlauf des Algorithmus bereits ein Teilweg von utm_S aus berechnet wurde.

Ist dies der Fall, so wird die dabei ermittelte Zeit $t(gz_{\mu}, utm_S)$ mit der neu berechneten Zeit $t(gz_{utm}, utm_S) + \text{value}(gz_{\mu}, gz_{utm})$ verglichen und die kleinere von beiden mit dem jeweils zugehörigen Teilweg als bislang bester gefundener Wert für die Geländezelle gz_{μ} gespeichert.

Wurde dagegen bislang kein Teilweg zu gz_{μ} bestimmt, so speichert der Algorithmus den Weg, welcher sich aus dem Teilweg von utm_S zu gz_{utm} und dem anschließenden Übergang von gz_{utm} zu gz_{μ} zusammensetzt, sowie die ermittelte Zeit $t(gz_{utm}, utm_S) + \text{value}(gz_{\mu}, gz_{utm})$ für die Geländezelle gz_{μ} als bislang besten gefunden Wert.

(5) Der Algorithmus wählt danach aus der Menge der Geländezellen – für welche bereits ein Teilweg bestimmt wurde – die Zelle gz aus, für welche der Zeitwert

$$t(gz, utm_S) + \text{bound}(gz, utm_Z) \quad (6.30)$$

minimal ist und verfährt danach wieder in der in (1)-(4) beschriebenen Weise.

²⁴² Kernstück des A*-Algorithmus ist die bereits in Fußnote 239 erwähnte Schätzfunktion. Hierzu lässt sich zeigen, dass der A*-Algorithmus nur dann immer den zeitoptimalen Weg findet, wenn die verwendete Schätzfunktion die Kosten des Restweges grundsätzlich nur unterschätzt. Im Fall der hier verwendeten Funktion ist dies jedoch gegeben, da durch Verwendung der Euklidischen-Distanz („Luftlinie“) und absoluten Höchstgeschwindigkeit jedes Gefechtselementes zur Zeitabschätzung sichergestellt ist, da dieses den Restweg in keinem Fall schneller bewältigen kann.

- (6) Der Algorithmus endet, sobald ein vollständiger Weg zwischen utm_s und der Geländezelle, welche utm_z enthält, ermittelt wurde.

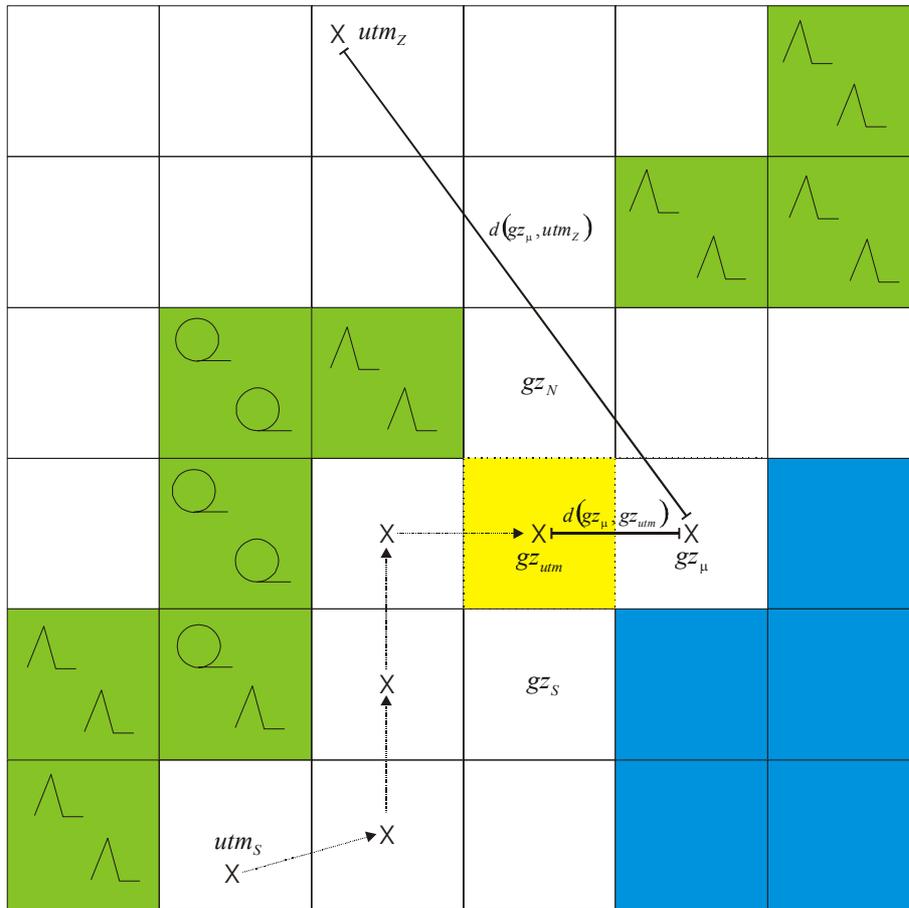


Abbildung 6.6: Bewegungsalgorithmus in SAMBA

Es bleibt festzuhalten, dass es sich bei dem Algorithmus in der vorgestellten Variante nur um ein Näherungsverfahren handelt, da durch Schritt 6 der Algorithmus bei erstmaligem Auffinden eines vollständigen Weges zum Ziel terminiert. Bei dem ersten gefundenen Weg zwischen utm_s und utm_z muss es sich jedoch noch nicht um den zeitoptimalen handeln, da weitere Zellen existieren können, welche einen direkten Übergang zur Zielgeländezelle ermöglichen. Diese Zellen können im Rahmen des Algorithmus bisher zwar schlechter bewertet worden sein, als dies für die zuletzt betrachtete Zelle der Fall war, jedoch den letzten Übergang zur Zielgeländezelle derartig besser ermöglichen, dass damit der bisherigen Bewertungsunterschied noch umgekehrt wird.

Der Algorithmus kann jedoch jederzeit auch als exaktes Verfahren verwendet werden, wenn die Suche nach Auffinden des ersten Weges nicht abgebrochen sondern so lange fortgesetzt wird, bis keine weitere Geländezelle gz existiert, für welche die Zeit $t(gz, utm_s) + bound(gz, utm_z)$ kleiner ist, als die zugehörige Zeit des bisher besten gefundenen Weges.

6.1.5.2 Bewegung von teilweise niedergehaltenen Gefechtselementen

Bei der Entwicklung des Gefechtssimulationssystems SAMBA wurde zur Modellierung der teilweisen Niederhaltung eines in Bewegung befindlichen Gefechtselementes der vorgestellte Ansatz der *Anpassung der Geschwindigkeit*²⁴³ gewählt. Der Ansatz wurde in SAMBA jedoch geeignet verändert, um einen stark erhöhten Verwaltungs- und Systemaufwand zu vermeiden. Diese Veränderung wird notwendig, da es sich bei SAMBA um ein ereignisgesteuertes Simulationssystem handelt, welches den Bewegungsablauf eines Gefechtselementes durch entsprechende Start- bzw. Ankunftsereignisse modelliert. Bewegt sich ein Gefechtselement auf dem vorberechneten Weg von Koordinate A nach Koordinate B, so kann dieser Bewegungsablauf als eine Folge des Betretens, Überquerens und Verlassens von Geländezellen betrachtet werden, wobei der jeweilige Bewuchs- bzw. Bebauungstyp der Zellen ausschlaggebend ist, für die maximal mögliche Geschwindigkeit und somit auch für die zur Überquerung benötigte Zeit. Die Bewegung eines Gefechtselementes über eine Geländezelle verläuft damit im Simulationssystem folgendermaßen:

Im Rahmen der Auswertung eines Bewegungsereignisses betritt ein Gefechtselement zum Zeitpunkt t_0 von einer der vier Hauptnachbarzellen aus eine Geländezelle mit dem Ziel, diese in Richtung einer der anderen drei Hauptnachbarzellen wieder zu verlassen. Aufgrund der bekannten räumlichen Ausdehnung einer Geländezelle sowie der bewuchs- bzw. bebauungsabhängigen Geschwindigkeit des Gefechtselementes kann in elementarer Weise der Zeitpunkt t_1 errechnet werden, zu dem das Element die Geländezelle wieder verlässt und in die angestrebte Nachbarzelle überwechselt. Ein entsprechendes Ereignis wird dazu zum Zeitpunkt t_1 in der Ereigniswarteschlange der Simulation eingeplant.

Gerät das entsprechende Gefechtselement während dieser Bewegung unter Beschuss und werden dadurch einige seiner Einzelsysteme niedergehalten, so sieht der gewählte Modellierungsansatz vor, dass die Geschwindigkeit des Gefechtelementes entsprechend angepasst, d.h. verringert wird. Die verringerte Geschwindigkeit hat aber zur Folge, dass der ursprünglich berechnete Zeitpunkt t_1 für das Verlassen der Geländezelle nicht länger korrekt ist. Das zugehörige Ereignis muss deshalb aus der Ereigniswarteschlange des Systems ausgeplant und zu einem entsprechend späteren Zeitpunkt t_2 wieder eingeplant werden. Lässt hingegen die Niederhaltungswirkung bei einem oder mehreren der betroffenen Einzelsysteme wieder nach, so führt dies zu einer höheren Geschwindigkeit und bedingt somit ebenfalls eine neue Berechnung des Zeitpunkts des Verlassens der Geländezelle sowie die Umplanung des zugehörigen Ereignisses in der Ereigniswarteschlange.

Es lässt sich erkennen, dass gerade bei kurzen Niederhaltezeiten und/oder heftigem Beschuss der Anteil niedergehaltener Einzelsysteme an der Gesamtzahl nicht ausgefallenerer Systeme eines Gefechtselementes einem häufigen Wechsel unterliegt. Dies führt zu einem gesteigerten Aufwand im Rahmen der Ereigniswarteschlangenverwaltung und damit zu einem erhöhten Systemaufwand.

Um dieses Problem zu umgehen bzw. abzumildern, liegt es nahe, die Anpassungssensitivität des Modellierungsansatzes zu reduzieren. In dem Modell SAMBA geschieht dies durch die Vorgabe einer Zahl von szenarspezifischen *Geschwindigkeitsklassen* und *Niederhaltungsschwellwerten*. Es wird dabei geprüft, ob der Anteil niedergehaltener Einzelsysteme an der Gesamtzahl nicht ausgefallener Systeme des Gefechtselementes diese Schwellwerte über- bzw. unterschreitet. Ist dies der Fall, so wechselt ein Gefechtselement in die zugehörige Ge-

²⁴³ vgl. Kapitel 5.1.4.4, S. 114f

schwindigkeitsklasse über, d.h. es verringert bzw. erhöht seine Geschwindigkeit auf einen vorgegebenen prozentualen Anteil der jeweils möglichen Maximalgeschwindigkeit. Gegenüber dem ursprünglichen Ansatz führt somit nicht jede Änderung der Zahl niedergehaltener Einzelsysteme eines Gefechtselementes zu einer Veränderung der Geschwindigkeit und somit zu dem beschriebenen Aufwand bei der Verwaltung der Ereigniswarteschlange.

Für die Umsetzung dieses modifizierten Ansatzes gelten in SAMBA grundsätzlich die folgenden Annahmen:

- (1) Es werden fünf Geschwindigkeitsklassen unterschieden, in denen sich ein Gefechtselemente befinden kann. Entsprechend der jeweiligen Geschwindigkeitsklasse bewegt es sich mit 100%, 75%, 50%, 25% oder 0% seiner aufgrund des vorliegenden Bewuchs- bzw. Bebauungstyps möglichen Maximalgeschwindigkeit.
- (2) Ausschlaggebend für die Feststellung der aktuellen Geschwindigkeitsklasse sind die benutzervorgegebenen und szenarspezifischen Niederhalteschwellwerte SI_1 , SI_2 , SI_3 und SI_4 , bei welchen es sich um die Angabe des jeweiligen prozentualen Anteils niedergehaltener Einzelsysteme des Gefechtselementes handelt, der über- bzw. unterschritten werden muss, um einen Wechsel der Geschwindigkeitsklasse auszulösen.
- (3) Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsklasse auf Basis des Anteils niedergehaltener Einzelsysteme des Gefechtselementes F gilt mit (vgl. Abbildung 6.7):

$$\hat{b}_s(F) = \frac{\bar{b}_s(F)}{\bar{b}(F)} \quad (6.31)$$

$$F \text{ in Geschwindigkeitsklasse } \left. \begin{array}{l} 1 (100\%) \\ 2 (75\%) \\ 3 (50\%) \\ 4 (25\%) \\ 5 (0\%) \end{array} \right\} \text{ falls gilt } \left. \begin{array}{l} \hat{b}_s(F) \leq SI_1 \\ SI_1 < \hat{b}_s(F) \leq SI_2 \\ SI_2 < \hat{b}_s(F) \leq SI_3 \\ SI_3 < \hat{b}_s(F) \leq SI_4 \\ SI_4 < \hat{b}_s(F) \end{array} \right\} \quad (6.32)$$

wobei

$$\begin{aligned} \bar{b}_s(F) &= \text{Anzahl niedergehaltener Einzelsysteme des Gefechtselementes } F \\ \bar{b}(F) &= \text{Anzahl nicht ausgefallener Einzelsysteme des Gefechtselementes } F \\ SI_{1,\dots,SI_4} &= \text{benutzervorgegebene Niederhalteschwellwerte in [\%]} \end{aligned}$$

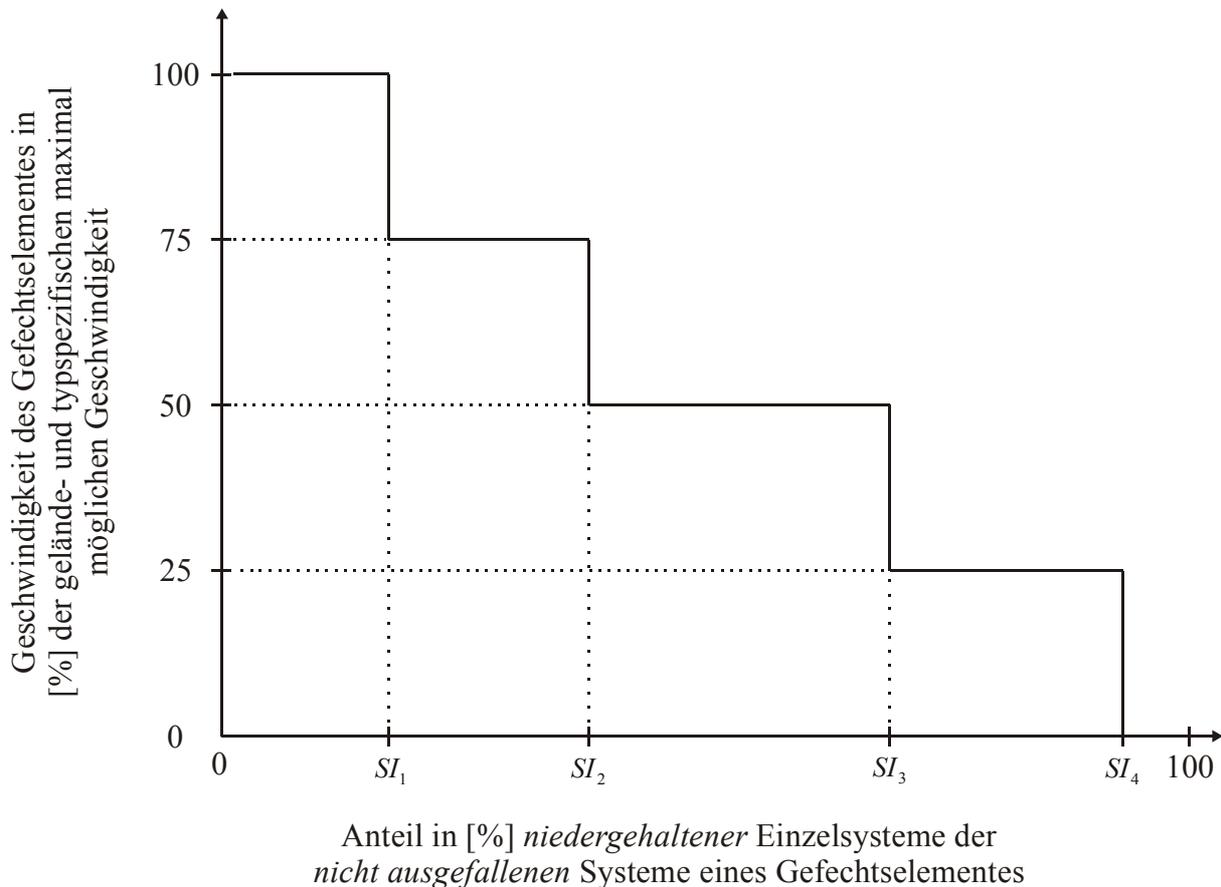


Abbildung 6.7: Beispielhafte Zuordnung der Geschwindigkeitsklassen durch Vorgabe der Niederhaltungsschwellwerte SI_1 bis SI_4

Neben der direkten Zu- bzw. Abnahme der Anzahl niedergehaltener Einzelsysteme eines Gefechtselementes durch Eintreten einer neuen bzw. Abklingen einer alten Niederhaltungswirkung kann sich der für die Bestimmung der Geschwindigkeitsklasse ausschlaggebende prozentuale Anteil offensichtlich auch durch den Totalausfall weiterer nicht niedergehaltener Einzelsysteme verändern und somit eine Anpassung der Geschwindigkeit notwendig machen. Hierbei kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass der Anteil niedergehaltener Einzelsysteme an der Gesamtzahl der Einzelsysteme des jeweiligen Gefechtselementes steigt, da nur nicht niedergehaltene Einzelsysteme einer Abnutzung durch Flachfeuer unterliegen und somit ausfallen können.²⁴⁴ Bei einem Ausfall von Einzelsystemen eines sich bewegenden Gefechtselementes ist es im beschriebenen Ansatz deshalb ausreichend, eine mögliche Verringerung der Geschwindigkeitsklasse zu prüfen.

Im Rahmen des Modells SAMBA führt die Veränderung der Geschwindigkeitsklasse eines Gefechtselementes dazu, dass das Simulationsereignis, welches das Ende des jeweiligen Bewegungsvorgangs repräsentiert, an dem aufgrund der bisherigen Geschwindigkeit des Elements errechneten Zeitpunkt aus der Ereigniswarteschlange des Systems entfernt und an dem korrekten neuen Zeitpunkt erneut eingeplant wird. Sinkt die Geschwindigkeitsklasse eines Gefechtselementes auf null, d.h. das Element unterbricht seine Bewegung, kann die neue Einplanung des entsprechenden Simulationsereignisses selbstverständlich erst nach einer erneu-

²⁴⁴ Bei einer Abbildung der Abnutzung durch Steilfeuerwaffensysteme wäre dieser Ansatz selbstverständlich nicht länger haltbar, da bei niedergehaltenen Einzelsystemen nicht automatisch davon ausgegangen werden kann, dass sie auch vollgedeckt und somit nicht erleideraktiv gegenüber Steilfeuer sind.

ten Änderung der Geschwindigkeitsklasse, d.h. nach Wiederaufnahme der Bewegung, stattfinden.

Grundsätzlich berechnet sich der korrekte neue Einplanungszeitpunkt des zugehörigen Simulationsereignisses nach Veränderung der Geschwindigkeitsklasse eines Gefechtselementes mit:

$$\begin{aligned}st_0 &= \text{Aktuelle Simulationszeit in Sekunden} \\st_1 &= \text{Bisher errechneter Eintreffzeitpunkt des entsprechenden Bewegungssimulationserignisses} \\st_2 &= \text{Aufgrund der veränderten Geschwindigkeitsklasse neu errechneter Eintreffzeitpunkt des entsprechenden Bewegungssimulationserignisses} \\MSC_1 &= \text{Alte Geschwindigkeitsklasse des Gefechtselementes in [\%]} \\MSC_2 &= \text{Veränderte Geschwindigkeitsklasse des Gefechtselementes in [\%]}\end{aligned}$$

und

$$MSC_1, MSC_2 > 0 \tag{6.33}$$

nach

$$st_2 = (st_1 - st_0) \cdot \frac{MSC_1}{MSC_2} + st_0 \tag{6.34}$$

Für den bereits angesprochenen Fall $MSC_2 = 0$, d.h. das Gefechtselement unterbricht seine Bewegung, errechnet sich der gesuchte Zeitpunkt st_2 nach erneuter Veränderung der Geschwindigkeitsklasse gemäß der leicht modifizierten Formel:

$$st_2 = (st_1 - st_0) \cdot \frac{MSC_1}{MSC_2} + st_3 \tag{6.35}$$

wobei

$$\begin{aligned}st_0 &= \text{Simulationszeitpunkt, zu dem die Geschwindigkeitsklasse auf 0\% gesunken ist} \\st_3 &= \text{Aktueller Simulationszeitpunkt, zu dem die Geschwindigkeitsklasse sich erneut verändert und somit von null verschieden ist} \\MSC_1 &= \text{Letzte Geschwindigkeitsklasse des Gefechtselementes vor Absinken auf 0\%}\end{aligned}$$

Anhand der bisherigen Fallunterscheidung wird außerdem ersichtlich, dass der bisher unberücksichtigte Fall $MSC_1 = 0$ nicht eintritt und somit bei der Berechnungsvorschrift für st_2 vernachlässigt werden kann.

6.2 Feststellen des Endes eines Simulationslaufes

Zur Feststellung, wann ein einzelner Simulationslauf beendet ist, werden in SAMBA die folgenden drei Kriterien unterschieden:

- (a) *Totalausfall einer Partei*: Alle in den Elementen einer Partei zusammengefassten Einzelsysteme sind vernichtet, d.h. zur aktuellen Simulationszeit τ gilt

$$N_B(\tau) = 0 \vee N_R(\tau) = 0$$

wobei

$$\begin{aligned} N_B(\tau) &= \text{Gesamtstärke der Partei Blau zum Simulationszeitpunkt } \tau \\ N_R(\tau) &= \text{Gesamtstärke der Partei Rot zum Simulationszeitpunkt } \tau \\ \tau &= \text{Aktuelle Simulationszeit} \end{aligned}$$

Als Gesamtstärke einer Partei ist dabei die Anzahl aller nicht ausgefallener Einzelsysteme (Schützen) zu verstehen, welche in Gefechtselementen der jeweiligen Partei zusammengefasst sind.²⁴⁵

- (b) *Erreichen der Abbruchstärke*: Es ist in dem Modell SAMBA möglich, im Rahmen eines Szenars für eine oder beide beteiligten Parteien eine Abbruchstärke zu definieren. Fällt die Gesamtstärke der Partei unter diese Abbruchstärke, so wird das Gefecht vorzeitig, d.h. vor der totalen Vernichtung einer der beiden Parteien, beendet. Es gilt also:

$$N_B(\tau) \leq N_B^{BP}(\tau) \vee N_R(\tau) \leq N_R^{BP}(\tau) \Rightarrow \text{Gefecht vorzeitig beenden}$$

wobei

$$\begin{aligned} N_B^{BP}(\tau) &= \text{Abbruchstärke der Partei Blau} \\ N_R^{BP}(\tau) &= \text{Abbruchstärke der Partei Rot} \end{aligned}$$

- (c) *Erreichen einer Endzeit*: Es ist im Rahmen der Beschreibung eines Szenars in SAMBA möglich eine Endzeit festzulegen. Erreicht die Simulationszeit diesen Zeitpunkt, so wird der jeweilige Simulationslauf auch vor Erfüllen der zuerst genannten Abbruchkriterien automatisch beendet. D.h. es gilt:

$$\tau = \tau_{END} \Rightarrow \text{Gefecht beenden}$$

wobei

$$\tau_{END} = \text{Vorgegebene Abbruchzeit}$$

²⁴⁵ Im Rahmen des Modells SAMBA macht diese einfache Definition von Gesamtstärke Sinn, da nur Einzelsysteme eines Typs – hier Infanteristen – abgebildet werden. Bei der Abbildung eines heterogenen Waffensystemspektrums sollten Stärken jeweils typenspezifisch betrachtet werden, so dass die Gesamtstärke einer Partei einen Vektor bildet.

6.3 Protokollierung und Auswertung in SAMBA

6.3.1 Allgemeine Daten

Das Modell SAMBA protokolliert während jedes Simulationslaufes spezifische Daten in einer Datenbank, welche zur späteren statistischen Auswertung dieses einen oder mehrerer Läufe genutzt werden können. In Anlehnung an die bereits genannten Maßgrößen zur Bewertung der Güte der aggregierten Abbildung²⁴⁶ umfassen diese Daten im Einzelnen:

1. Die *absoluten Stärken der Parteien* Blau und Rot zu äquidistanten Zeitpunkten²⁴⁷.
2. Die *Dauer des Gefechts*, d.h. die bis zur völligen Vernichtung einer der beiden Parteien oder dem Erfüllen eines anderen Abbruchkriteriums verstrichene Simulationszeit (in [sek]).
3. Die *Endstärken der Parteien* Blau und Rot (in [Einzelsystemen]), d.h. die absoluten Stärken nach Erfüllen eines Abbruchkriteriums.
4. Die Gesamtzahl der durch Einzelsysteme der Parteien Blau und Rot jeweils *abgegebenen Schüsse* (in [Schüsse]).
5. Die Gesamtzahl der durch Einzelsysteme der Parteien Blau und Rot jeweils durchgeführten *Mehrfachbekämpfungen*²⁴⁸ (in [Schüsse]), d.h. die Zahl der auf bereits ausgefallene Einzelsysteme abgegebenen Schüsse.
6. Die Zahl der durch aggregierte Gefechtselemente durchgeführten *Aufklärungsprozesse* (in [Ereignisse]) der Parteien Blau und Rot.
7. Die Zahl der durch aggregierte Gefechtselemente durchgeführten *Abnutzungsprozesse* (in [Ereignisse]) der Parteien Blau und Rot.
8. Die für den jeweiligen Simulationslauf insgesamt *benötigte Rechenzeit* (in [sec]).

Anhand der gespeicherten absoluten Stärken, der Endstärken sowie der Dauer des Gefechts ermittelt das Auswertemodul von SAMBA für jeden einzelnen Simulationslauf abschließend den Kräfteverlauf der Parteien Blau und Rot über der Simulationszeit (vgl. Abbildung 6.8).

Für eine vorgegebene Anzahl an Simulationsläufen, welche mit jeweils dem selben Szenar durchgeführt wurden, ermittelt das SAMBA-Auswertemodul weiterhin:

²⁴⁶ vgl. Kapitel 5.3, S. 120ff

²⁴⁷ In der Regel erfolgt dies nach jeweils 2 Sekunden Simulationszeit. Dieser Wert kann durch den Benutzer aber beliebig sinnvoll angepasst werden. Zu kleine oder zu große Zeitintervalle sollten dabei jedoch vermieden werden, da sie entweder zu einem zu großen Verwaltungs- und damit Systemaufwand führen oder im Falle zu großer Intervalle keine detaillierte Verfolgung des Kräfteverlaufs mehr ermöglichen.

²⁴⁸ Das Zustandekommen von Mehrfachbekämpfungen in SAMBA hat seine Ursache einerseits darin, dass bei der Bekämpfung eines Gefechtselements durch ein anderes, mehrere Einzelsysteme des Verursachers dasselbe Einzelsystem des Erleiders bekämpfen können (vgl. Kapitel 6.1.4.4). Führt einer der ersten Schüsse bereits zu einem Treffer und Ausfall des Einzelsystems, so sind alle weiteren auf dieses System abgegebenen Schüsse als Mehrfachbekämpfungen zu werten. Andererseits kann der Fall auftreten, dass zwei Gefechtselemente unabhängig voneinander dasselbe feindliche Gefechtselement bekämpfen. Dabei kann es analog zum ersten Fall zu Mehrfachbekämpfungen kommen, sobald ein beschossenes Einzelsystem ausfällt.

1. den Verlauf der geschätzten *Erwartungswerte der Gesamtstärken* der Parteien Blau und Rot über der Simulationszeit sowie den Verlauf der zugehörigen geschätzten *Standardabweichungen*,
2. den geschätzten *Erwartungswert der Gefechtsdauer* sowie die zugehörige geschätzte *Standardabweichung*,
3. die *relativen Gewinnhäufigkeiten* beider Parteien,
4. den geschätzten Erwartungswert der *Endstärke der siegreichen Partei* nach Erreichen eines Abbruchkriteriums sowie die zugehörige geschätzte *Standardabweichung* sowie
5. den geschätzten *Erwartungswert der benötigte Rechenzeit* und ebenfalls die zugehörige geschätzte *Standardabweichung*.

Der *Verlauf der Erwartungswerte der Gesamtstärken* der Parteien Blau und Rot über der Simulationszeit wird dazu geschätzt mit Hilfe der Formeln:

$$E(N_B(\tau)) = \frac{1}{\Phi} \sum_{\phi=1}^{\Phi} N_B^{\phi}(\tau) \quad (6.36)$$

$$E(N_R(\tau)) = \frac{1}{\Phi} \sum_{\phi=1}^{\Phi} N_R^{\phi}(\tau) \quad (6.37)$$

wobei

$E(N_B(\tau))$ = Anhand der Ergebnisse von Φ Simulationsläufen geschätzter Erwartungswert der Gesamtstärke der Partei Blau zum Simulationszeitpunkt τ

$E(N_R(\tau))$ = Anhand der Ergebnisse von Φ Simulationsläufen geschätzter Erwartungswert der Gesamtstärke der Partei Rot zum Simulationszeitpunkt τ

$N_B^{\phi}(\tau)$ = zum Zeitpunkt τ im ϕ .ten von Φ Simulationsläufen protokollierte Gesamtstärke der Partei Blau ($1 \leq \phi \leq \Phi$)

$N_R^{\phi}(\tau)$ = zum Zeitpunkt τ im ϕ .ten von Φ Simulationsläufen protokollierte Gesamtstärke der Partei Rot ($1 \leq \phi \leq \Phi$)

Die zugehörigen geschätzten *Standardabweichungen* ergeben sich dann gemäß

$$V(N_B(\tau)) = \pm \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{\phi=1}^{\Phi} (N_B^{\phi}(\tau) - E(N_B(\tau)))^2} \quad (6.38)$$

$$V(N_R(\tau)) = \pm \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{\phi=1}^{\Phi} (N_R^{\phi}(\tau) - E(N_R(\tau)))^2} \quad (6.39)$$

wobei

$V(N_B(\tau))$ = Anhand der Ergebnisse von Φ Simulationsläufen geschätzte Standardabweichung der Gesamtstärke der Partei Blau zum Simulationszeitpunkt τ

$V(N_R(\tau))$ = Anhand der Ergebnisse von Φ Simulationsläufen geschätzte Standardabweichung der Gesamtstärke der Partei Blau zum Simulationszeitpunkt τ

Die Erwartungswerte der *Gefechtsdauer*, der *Endstärke* sowie der *benötigten Rechenzeit* inklusive der jeweiligen Standardabweichung werden durch analoge Anwendung der obigen Formeln geschätzt.

Die *absoluten Gewinnhäufigkeiten* der Parteien Blau und Rot schließlich, ergeben sich in natürlicher Weise aus dem Verhältnis der jeweiligen Gesamtzahl der gewonnen Gefechte der Parteien Blau bzw. Rot sowie der Zahl Φ der durchgeführten Simulationsläufe.

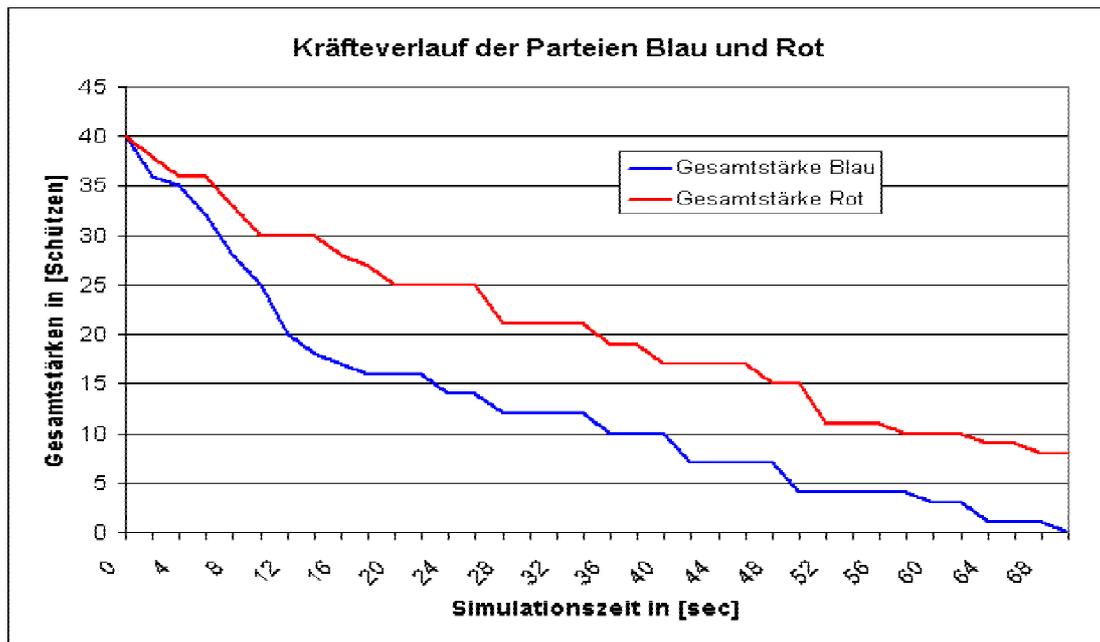


Abbildung 6.8: Beispielhafter Kräfteverlauf der Parteien Blau und Rot in einem SAMBA-Simulationslauf

6.3.2 Detailprotokoll eines Simulationslaufs

Die bisher genannten protokollierten Daten sowie ihre statistische Auswertung lassen zwar einen Vergleich der Ergebnisse einzelner Simulationsläufe und Szenarien zu, erlauben jedoch keine detaillierte Untersuchung der Ursachen dieser Ergebnisse. Zu diesem Zweck kann durch das Auswertemodul des Modells SAMBA für alle oder ausgewählte Simulationsläufe ein zusätzliches Detailprotokoll angefertigt werden, welches das exakte Nachvollziehen des Verhaltens jedes einzelnen Gefechtselements und damit des gesamten Gefechtsgeschehens erlaubt.

Eine genaue Beschreibung des dabei verwendeten Protokollformates enthält Anhang B.

7 UNTERSUCHUNGEN MIT DEM MODELL SAMBA

7.1 Allgemeine Systematik der Versuchsreihen

Ziel der im Folgenden vorgestellten Versuchsreihen mit dem Modell SAMBA ist es, die allgemeine Eignung des Leitschützenprinzips für die aggregierte Abbildung elementarer Gefechtsprozesse mit einem vereinfachten Modell exemplarisch zu untersuchen.

Für diese systematische Untersuchung des Leitschützenprinzips werden drei grundsätzliche Versuchsreihen durchgeführt. Jede dieser Versuchsreihen beschäftigt sich mit einem spezifischen Aspekt des Leitschützenprinzips und verfügt zu diesem Zweck über ein Grundsenar, welches in einer jeweils vorgegebenen Art und Anzahl an Variationen betrachtet wird. Bei den drei Versuchsreihen handelt es sich im Einzelnen um:

1. *Grundlegende Untersuchungen*: Inhalt dieser Untersuchungen ist die allgemeine Bewertung der Eignung und Abbildungsgüte des Leitschützenprinzips.
2. *Untersuchungen zu asymmetrischen Mächtigkeiten*: Diese Versuchsreihe beschäftigt sich mit dem in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Problemfeld der asymmetrischen Mächtigkeiten und seinen Auswirkungen auf die Abbildungsgüte der aggregierten Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips.
3. *Untersuchungen zur Sichtbereichsproblematik*: Die dritte Versuchsreihe schließlich hat die in Kapitel 5.3.3 beschriebene Problematik der Über- bzw. Unterbewertung von Sichtmöglichkeiten bei pauschaler Sichtlinienbestimmung zwischen aggregierten Gefechtssegmenten zum Inhalt.

Die Bewertung der Abbildungsgüte des Leitschützenprinzips erfolgt dabei jeweils in den Bereichen

- **Rechenzeitverhalten** sowie
- **Konsistenz** in der Abbildung im Vergleich zur nichtaggregierten Abbildung.

Das Rechenzeitverhalten erlaubt eine Bewertung in einfacher Weise durch Messung und anschließendem Vergleich der Rechenzeiten, welche das Modell SAMBA für die Simulation eines vorgegebenen Szenars bei Einzelsystemabbildung einerseits bzw. verschieden starker Aggregation bei Anwendung des Leitschützenprinzips andererseits benötigt.

Für die Bewertung des Bereichs der Konsistenz in der Abbildung werden in Anlehnung an die von [Davis, Bigelow 98] vorgeschlagene erweiterte Definition des Begriffs der *starken Konsistenz*²⁴⁹ Teile der Simulationsergebnisse eines vorgegebenen Szenars bei Einzelsystemabbildung bzw. aggregierter Abbildung verglichen (vgl. Abbildung 7.1). Als relevante Teile der Simulationsergebnisse werden aus den bereits in Kapitel 5.3.1 genannten Gründen

- die relative *Gewinnhäufigkeit* für Blau bzw. Rot,
- der geschätzte Erwartungswert der *Dauer des Gefechts*,

²⁴⁹ vgl. Kapitel 3.3.2, S. 25

- der geschätzte Erwartungswert der *Endstärke* der siegreichen Partei,
 - der *Verlauf* der Erwartungswerte der *Gesamtstärken* der Parteien über der Simulationszeit
- sowie die jeweils ebenfalls geschätzten zugehörigen Standardabweichungen gewählt und bezüglich des Vorliegens starker Konsistenz bewertet.

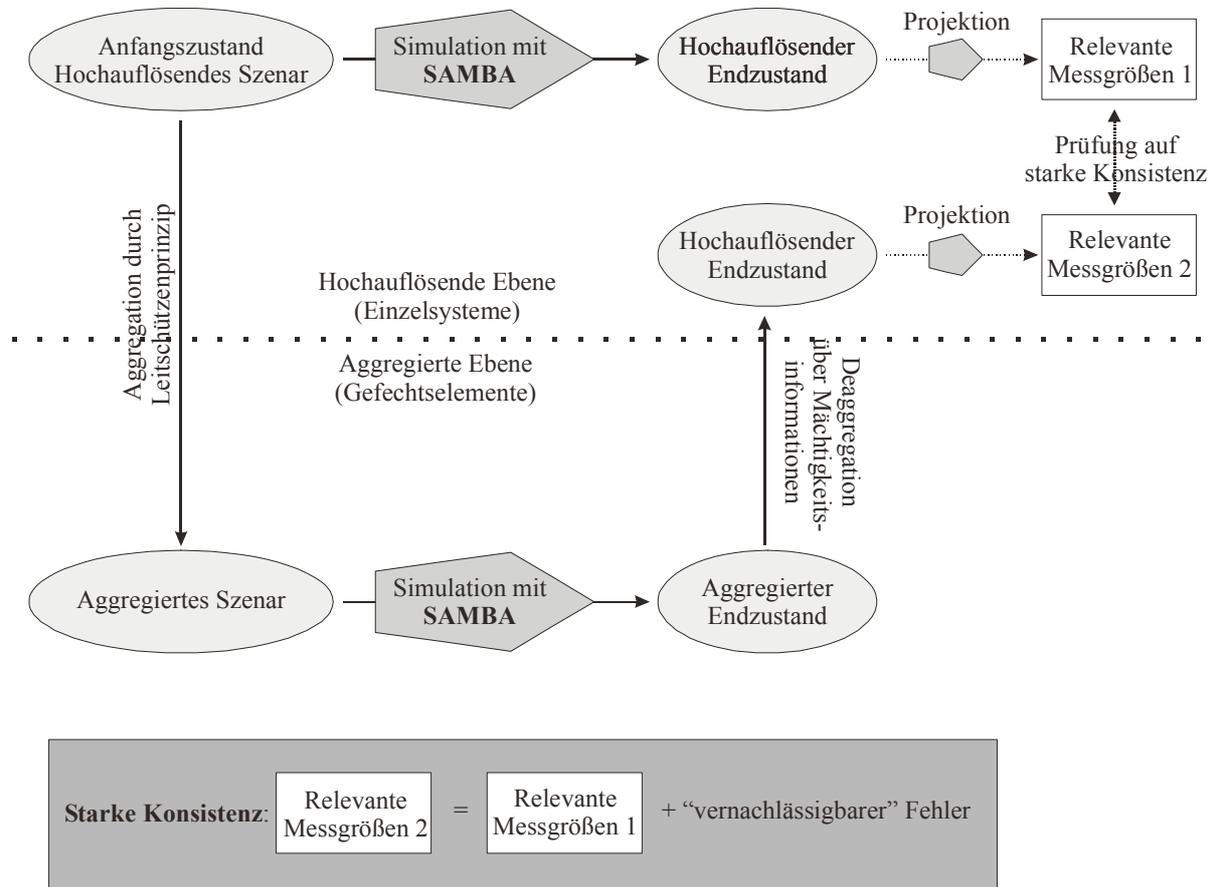


Abbildung 7.1: Vorgehensweise zur Prüfung der Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips auf starke Konsistenz in Anlehnung an [Davis, Bigelow 98]

Die nach [Davis, Bigelow 98] dazu notwendige Deaggregationsfunktion, welche die aggregierten Simulationsergebnisse mit denen der hochauflösenden Einzelsystemebene vergleichbar macht, muss hierbei offenkundig nur bei Betrachtung der Endstärken sowie der Kräfteverläufe Verwendung finden, da einzig diese beiden Bewertungsgrößen im Rahmen des Leitschützenprinzips einer Aggregation unterliegen. Sowohl bei der Endstärke als auch bei den Kräfteverläufen ist die geforderte Projektionsfunktion jedoch durch Rückgriff auf die stets vorhandene Information über die aktuelle Mächtigkeit jedes einzelnen Gefechts-elementes realisierbar. Diese ermöglicht die Deaggregation der ermittelten Zahlen aggregierter Gefechts-elemente auf individuelle Einzelsysteme und somit einen Vergleich der jeweiligen Simulationsergebnisse.

Für die eigentliche Bewertung der Abbildungsgüte durch anschließende Prüfung auf Vorliegen starker Konsistenz ist aus leicht nachvollziehbaren Gründen die jeweils verwendete Definition des Begriffs des „vernachlässigbaren“ Fehlers von zentraler Bedeutung. Diese Definition setzt notwendigerweise die Beantwortung der Frage voraus, welche Abweichungen zwi-

schen den als relevant beurteilten Teilen der Simulationsergebnisse bei Einzelsystemabbildung bzw. aggregierter Abbildung im Rahmen der jeweiligen Anwendung des Modells toleriert werden können. Eine von dem jeweils betrachteten Szenar sowie dem Zweck der durchgeführten Untersuchungen unabhängige Beantwortung ist grundsätzlich nur eingeschränkt möglich, da sowohl das Szenar als auch der Untersuchungszweck offensichtlich Einfluss auf die Akzeptanz möglicher Abweichungen besitzen können. Darüber hinaus müssen selbstverständlich verschiedene Teile der relevanten Simulationsergebnisse separat betrachtet werden, da für die einzelnen Bewertungsgrößen auch im Rahmen eines Szenars bzw. Analysezweckes ebenfalls unterschiedliche Maßstäbe angelegt werden können.²⁵⁰

Für die im Folgenden durchgeführten Versuchsreihen wird in Form der jeweils im nicht aggregierten Fall geschätzten Standardabweichung eine obere Schranke für die tolerierten Abweichungen der genannten Bewertungsgrößen vorgegeben. Mit Blick auf diese Schranke werden dann die folgenden Annahmen für die Konsistenzbewertung getroffen:

- (1) Abweichungen der Bewertungsgrößen im aggregierten Fall, *welche diese obere Schranke überschreiten*, werden grundsätzlich als nicht vernachlässigbar bewertet und führen somit dazu, dass gemäß der vorgestellten Definition keine starke Konsistenz vorliegt.
- (2) Abweichungen, *welche nur geringfügig unterhalb dieser oberen Schranke liegen*, werden zusätzlich mit Blick auf ihre Bedeutung für das abgebildete Szenar betrachtet, so dass gegebenenfalls auch hier das Vorliegen starker Konsistenz verworfen werden muss, falls ihre Interpretation dies nahe legt.

Die Standardabweichung der nicht aggregierten Ebene wird hierbei als obere Schranke gewählt, da sie ein gängiges Maß für die zufälligen Schwankungen der Bewertungsgrößen darstellt, welche aufgrund der stochastischen Anteile des Modells zustande kommen. Solche Schwankungen stellen Abweichungen dar, welche von der Aggregation unabhängig sind und somit auch nicht zum Verwerfen der Konsistenzhypothese führen dürfen. Gegenüber der alternativ denkbaren Verwendung der ebenfalls gängigen geschätzten quadratischen Standardabweichung besitzt die Standardabweichung zusätzlich den Vorteil der gleichen Einheit wie die zugehörigen Erwartungswerte. Ein Vergleich der Schwankungen in Form der Standardabweichungen mit dem jeweils gegebenen absoluten Niveau in Form der geschätzten Erwartungswerte wird dadurch erleichtert.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass aus den oben genannten Gründen die Standardabweichung als das hier verwendete Maß für die tolerierte Abweichung nicht als Vorschlag für eine generell gültige Größe zu verstehen ist, sondern vielmehr einzig im Zusammenhang mit der durchgeführten Bewertung der Abbildungsgüte. Bei einer Verwendung des Leitschützenprinzips in anderen Modellen und Untersuchungsreihen bedarf es deshalb im Rahmen von Konsistenzbewertungen grundsätzlich einer neuen Definition des Begriffs des „vernachlässigbaren“ Fehlers.

²⁵⁰ Dies setzt gemäß [Davis, Bigelow 98] natürlich voraus, dass jeweils dieselben Maßgrößen als relevante Teile der Simulationsergebnisse gewählt worden sind. Werden im Rahmen unterschiedlicher Analyseziele bzw. Szenarien deutlich unterschiedliche Abweichungen einer Maßgröße als „vernachlässigbar“ definiert, so sollte dies gegebenenfalls zum Anlass genommen werden, die Relevanzüberlegungen für die jeweilige Maßgröße einer Kontrolle zu unterziehen und diese eventuell im Rahmen einer Analyse als generell nicht relevant zu bewerten.

Ausgehend von diesen grundsätzlichen Vorgaben werden ausgesuchte Kenngrößen des Szenars systematisch verändert, um eventuelle Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Beurteilung der Abbildungsgüte zu untersuchen. Die systematisch veränderten Kenngrößen des Szenars umfassen dabei:

1. Den *Grad der Aggregation*, gegeben durch die jeweils gewählte Anfangsmächtigkeit der einzelnen Gefechtselemente beider Parteien: Die Anfangsmächtigkeiten werden dabei zwischen der Mächtigkeit 1, d.h. der Abbildung von 32 Einzelsystemen, sowie der Mächtigkeit 32, d.h. der maximal aggregierten Abbildung beider Parteien durch jeweils ein aggregiertes Gefechtselement, in den Schritten 2, 4, 8 und 16 variiert. Insgesamt werden somit 6 Aggregationsstufen betrachtet (vgl. Abbildung 7.3). Die Symmetrie der Ausgangslage bleibt erhalten, indem für alle Gefechtselemente beider Parteien die jeweils gleiche Anfangsmächtigkeit gewählt wird.
2. Die *Distanz zwischen den Kräften beider Parteien*: Um den Einfluss der entfernungsabhängigen Entdeckungswahrscheinlichkeiten auf die Aufklärungsprozesse der einzelnen Systeme bzw. Elemente zu untersuchen und eventuelle Auswirkungen der Aggregation auf diesen Einfluss zu bewerten, werden drei Variationen des Grundszenarios betrachtet, in welchen die Kräfte der Parteien Blau und Rot sich in 100m, 500m bzw. 1.000m Entfernung gegenüberstehen (vgl. Abbildung 7.4). Diese drei Entfernungen wurden dabei im Hinblick auf die gegebenen Stützentfernungen des Sensorsystems der Einzelsysteme so gewählt, dass jeweils genau ein Abschnitt des beschriebenen Verlaufs der Entdeckungswahrscheinlichkeitsfunktion²⁵² betroffen ist.
3. Der *Feuerkoordinierungsgrad* der Gefechtselemente: Gegenüber der Einzelsystemabbildung, bei welcher in SAMBA grundsätzlich keine Feuerkoordination zwischen den Waffensystemen einer Partei stattfindet, wird den Gefechtselementen im aggregierten Fall ein Feuerkoordinierungsgrad zugewiesen, welcher in der beschriebenen Art und Weise die Feuerverteilung der Einzelsysteme eines Gefechtselementes auf die Einzelsysteme des jeweiligen Erleidergefechtselementes koordiniert. Sinnvollerweise muss somit untersucht werden, welche Auswirkung verschiedene Ausprägungen des Feuerkoordinierungsgrades auf den Verlauf eines Gefechts und damit die Güte der Abbildung bezüglich der Konsistenz zwischen aggregierter und nicht aggregierter Abbildung haben. Zu diesem Zweck werden die aggregierten Szenarien jeweils mit einem – für alle Gefechtselemente einheitlichen – Feuerkoordinierungsgrad von 0%, 25%, 50%, 75% sowie 100% simuliert.
4. Die *entfernungsunabhängige Treffwahrscheinlichkeit*: Als letzte Kenngröße wird für jedes Szenar die entfernungsunabhängige Treffwahrscheinlichkeit in den Ausprägungen 25%, 50% und 75% betrachtet (vgl. Abbildung 7.2). Diese Variation zielt darauf ab, prototypisch den Einfluss markanter Leistungsdaten der Einzelsysteme auf den Verlauf des Gefechts sowohl bei Einzelsystemabbildung als auch im aggregierten Fall zu untersuchen.²⁵³

²⁵² vgl. Kapitel 6.1.4.2, S. 133

²⁵³ An dieser Stelle wurde eine Variation der entfernungsunabhängigen Treffwahrscheinlichkeit gewählt, um so eine Veränderung der Treffwahrscheinlichkeit durch zu- oder abnehmende Gefechtsdistanzen nachzubilden, wie sie im Rahmen einer in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen üblichen (z.B. auf Streuungswerten der Waffensysteme basierenden) entfernungsabhängigen Abbildung auftreten würde. Die im Rahmen der Wirkungsermittlung eines Treffers ebenfalls genutzte Wirkwahrscheinlichkeit (vgl. Kapitel 6.1.4.6, S. 146) unterliegt dagegen keiner Variation und wird konstant auf 75% gesetzt.

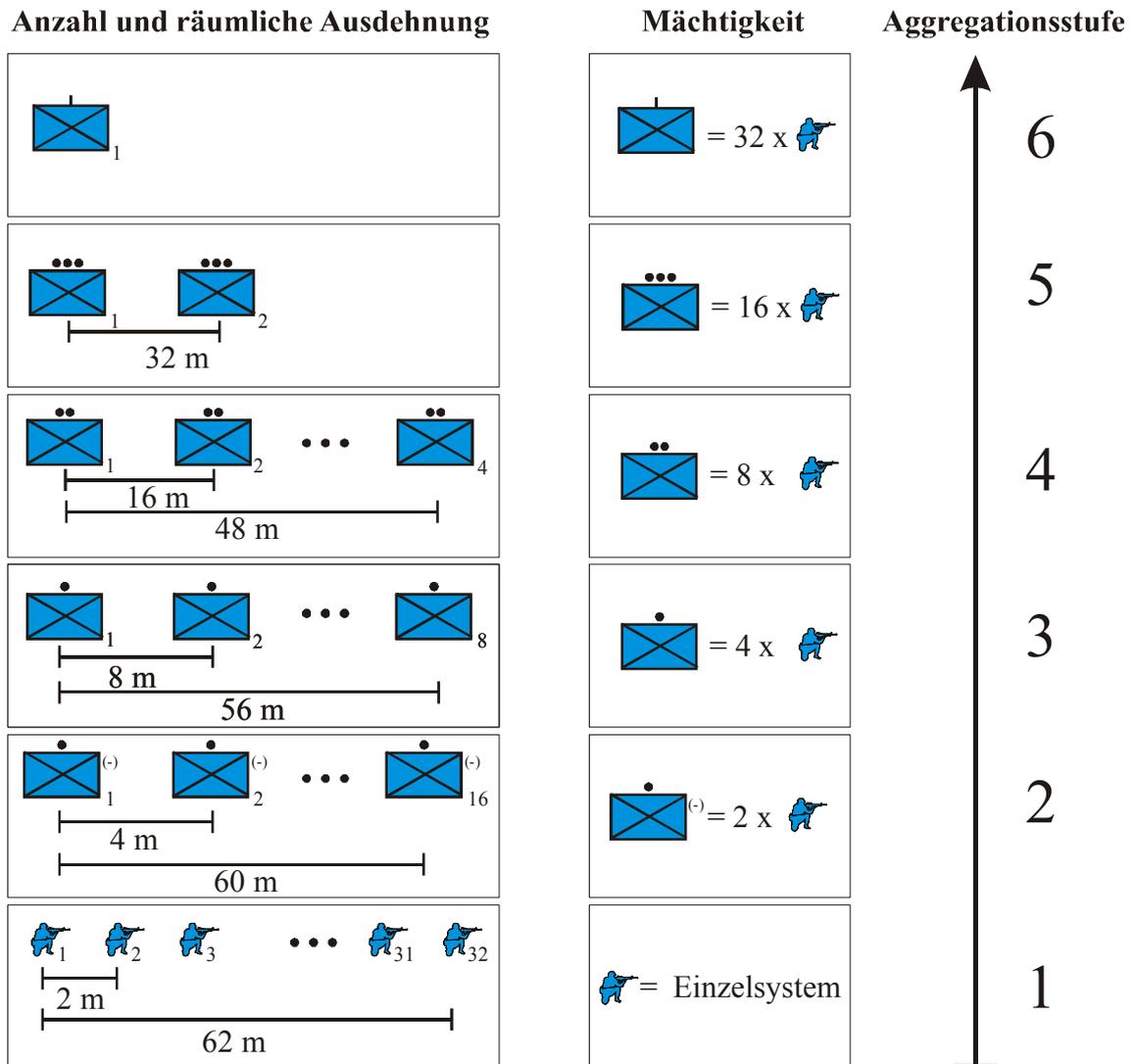


Abbildung 7.3: Anzahl, Mächtigkeit und räumliche Dislozierung der Gefechts-elemente einer Partei bei äquidistant linearer Aufstellung

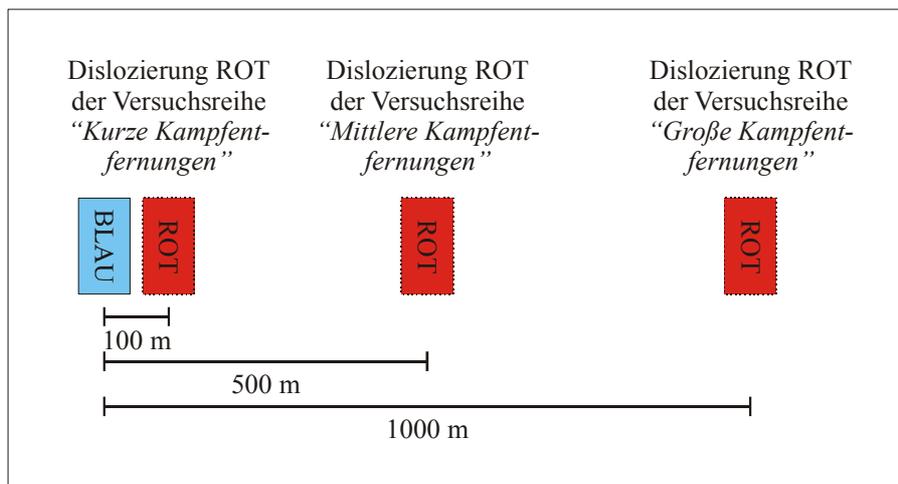


Abbildung 7.4: Gewählte dreistufige Variation in der Kampfentfernung zwischen den Parteien Blau und Rot

Insgesamt ergeben sich somit 234 Varianten (vgl. Abbildung 7.5) des beschriebenen Grund- szenars, mit welchen jeweils eine konstante Zahl von 1.000 Simulationsläufen (Replikatio- nen) durchgeführt wird, um dadurch statistisch verwertbare Daten zu erhalten. Als Abbruch- kriterium wird dabei die völlige Vernichtung einer der beiden Parteien gewählt, so dass die Identifikation des jeweiligen Siegers grundsätzlich problemlos möglich ist.

Die beschriebene Protokollierungs- und Auswertefunktionalität²⁵⁴ von SAMBA wird dazu genutzt, die relevanten Teile der Simulationsergebnisse jedes einzelnen Simulationslaufes aufzuzeichnen und für jede Variation aus der Summe der Daten der jeweiligen Simulations- läufe die entsprechenden geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen zu ermit- teln.

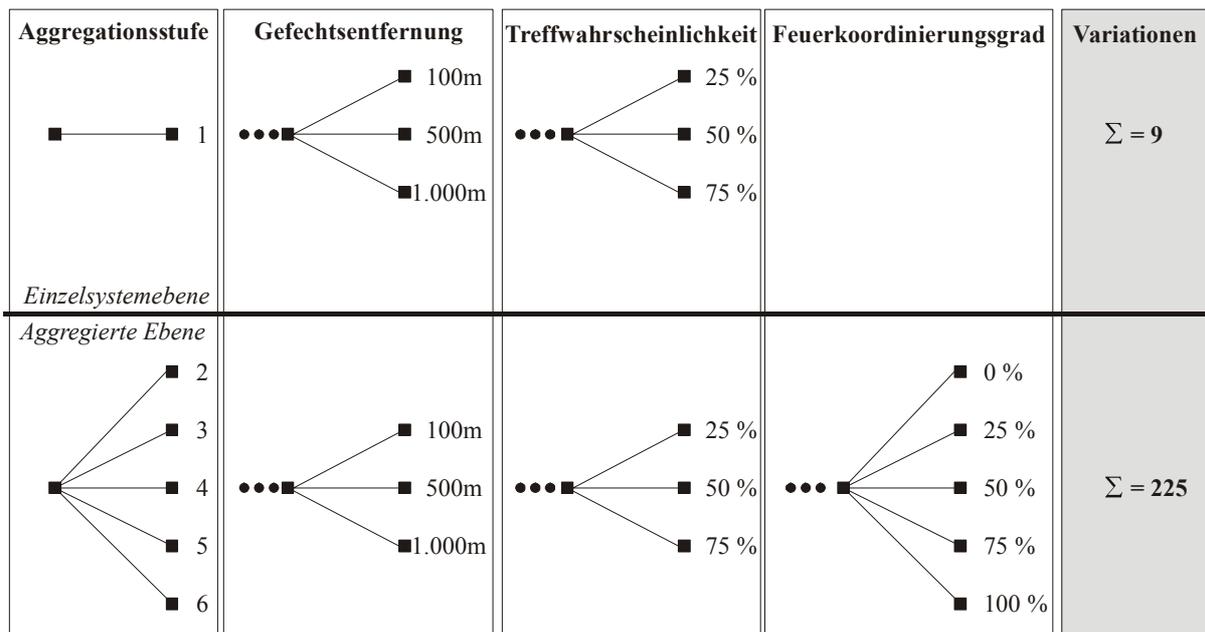


Abbildung 7.5: In Versuchsreihe I betrachtete Varianten des Grundszenars

²⁵⁴ vgl. Kapitel 6.3, S. 155

7.2.2 Bezeichnung der Grundszenarvarianten in der Versuchsreihe I

Im Folgenden wird zur einfacheren Identifikation der beschriebenen Varianten des Grundszenars eine eigene 4-teilige Bezeichnungsweise verwendet, welche die jeweiligen Ausprägungen der variierten Kenngrößen (vgl. Abbildung 7.5) beschreibt. Die Bezeichnung einer Variante setzt sich dazu aus den folgenden Größen zusammen in der Reihenfolge:

Aggregationsstufe-Gefechtsentfernung-Treffwahrscheinlichkeit-Feuerkoordinierungsgrad.

Die Bezeichnung 2-100-25-75 beschreibt damit z.B. eine Variante des Grundszenars, in welcher die Einzelsysteme jeder Partei auf der Aggregationsstufe 2, d.h. in 16 aggregierten Gefechtselementen der Mächtigkeit 2, abgebildet werden, sich in 100m Kampffernung gegenüberstehen, über eine Treffwahrscheinlichkeit von 25% verfügen und die Gefechtselemente einen Feuerkoordinierungsgrad von 75% besitzen.

Wird eine oder mehrere der Kenngröße in der Bezeichnung durch eine Variable ersetzt, so identifiziert dies die Menge aller Varianten des Grundszenars, welche über die durch die Bezeichnung eindeutig festgelegten Kenngrößenausprägungen verfügen.

Die Bezeichnung 2-x-25-75 würde somit die Menge der drei Varianten 2-100-25-75, 2-500-25-75 sowie 2-1000-25-75 des Grundszenars identifizieren.

7.2.3 Bewertung des Rechenzeitverhaltens

Die Auswertung aller Simulationsläufe mit den beschriebenen Varianten des Grundszenars lässt erkennen, dass die Aggregation durch Einsatz des Leitschützenprinzips den vermuteten **Rechenzeitgewinn** gegenüber einer Einzelsystemabbildung erbringen kann.

Eine Betrachtung der ermittelten Zahlen stellvertretend²⁵⁵ anhand der Variantengruppe $x-y-z-0$ (vgl. Abbildung 7.6 bis Abbildung 7.8) lässt darüber hinaus folgende Aussagen zu:

- Eine *Erhöhung der Aggregationsstufe* führt unabhängig von der verwendeten Gefechtsdistanz und Treffwahrscheinlichkeit stets zu einer kontinuierlichen Reduzierung des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit pro Simulationslauf.
- Eine *Verringerung der Treffwahrscheinlichkeit* führt grundsätzlich zu einer Erhöhung des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit pro Simulationslauf.
- Eine *Erhöhung der Gefechtsdistanz* führt bei Beibehaltung der restlichen Kenngrößen in einer Variantengruppe grundsätzlich zu einer absoluten Erhöhung des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit, wobei diese Erhöhung mit steigender Aggregationsstufe stetig kleiner wird.

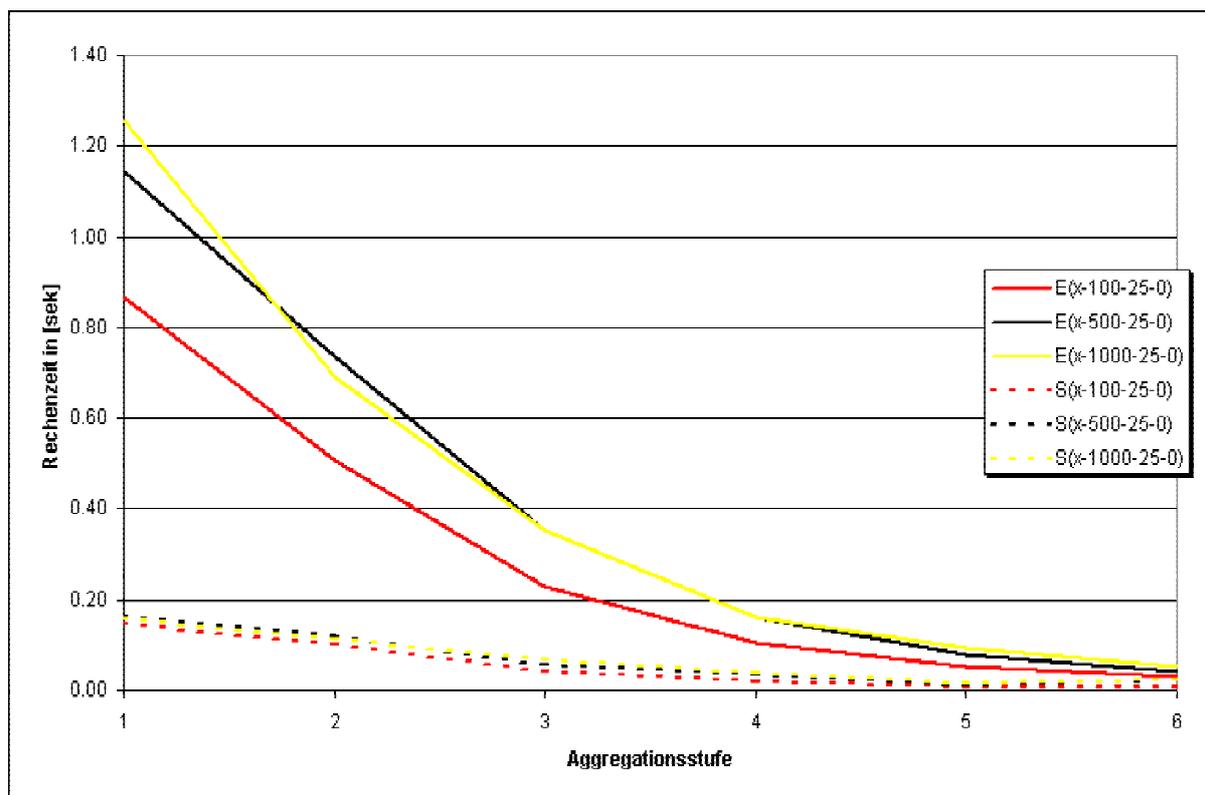


Abbildung 7.6: Geschätzte Erwartungswerte (E) und Standardabweichungen (S) der Rechenzeit pro Simulationslauf (Variantengruppe $x-y-25-0$)

²⁵⁵ Eine entsprechende Auswertung aller untersuchten Variationen wurde durchgeführt und hat die getroffenen Aussagen auch für die restlichen Grundszenarvarianten bestätigt. Auf ihre explizite graphische Darstellung wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet.

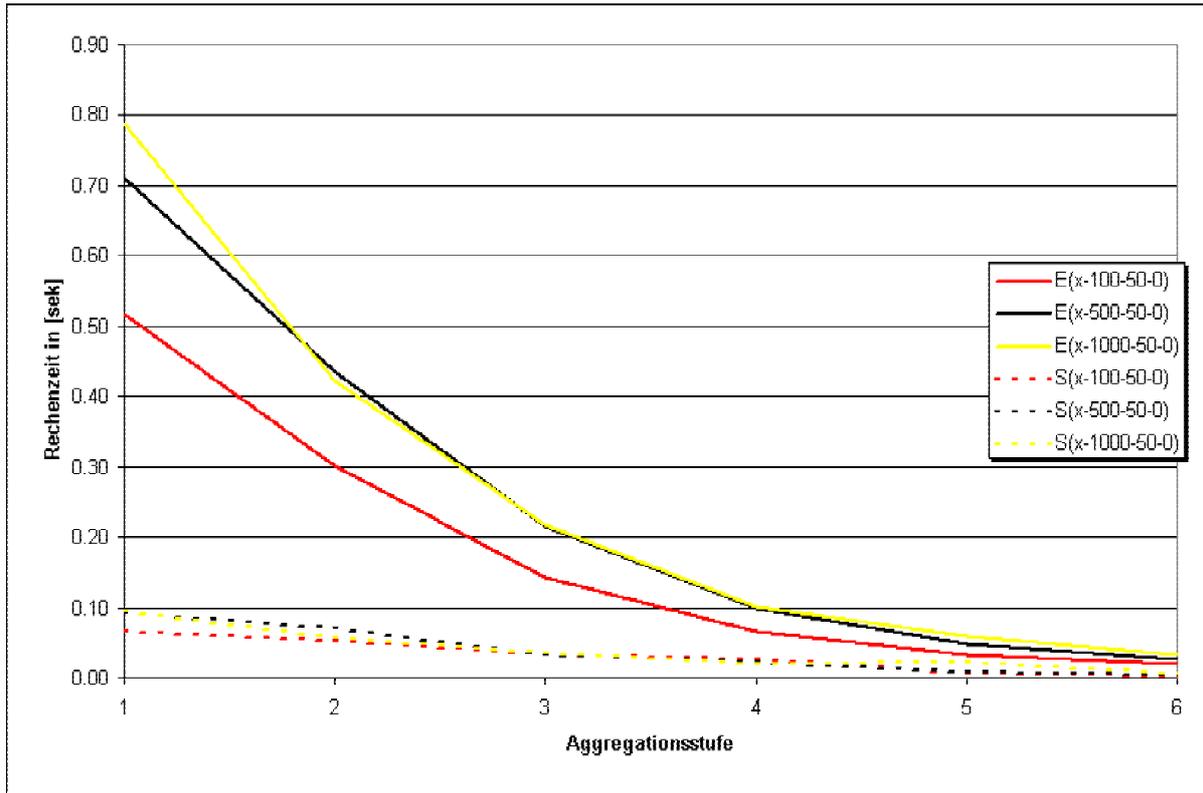


Abbildung 7.7: Geschätzte Erwartungswerte (E) und Standardabweichungen (S) der Rechenzeit pro Simulationslauf (Variantengruppe x-y-50-0)

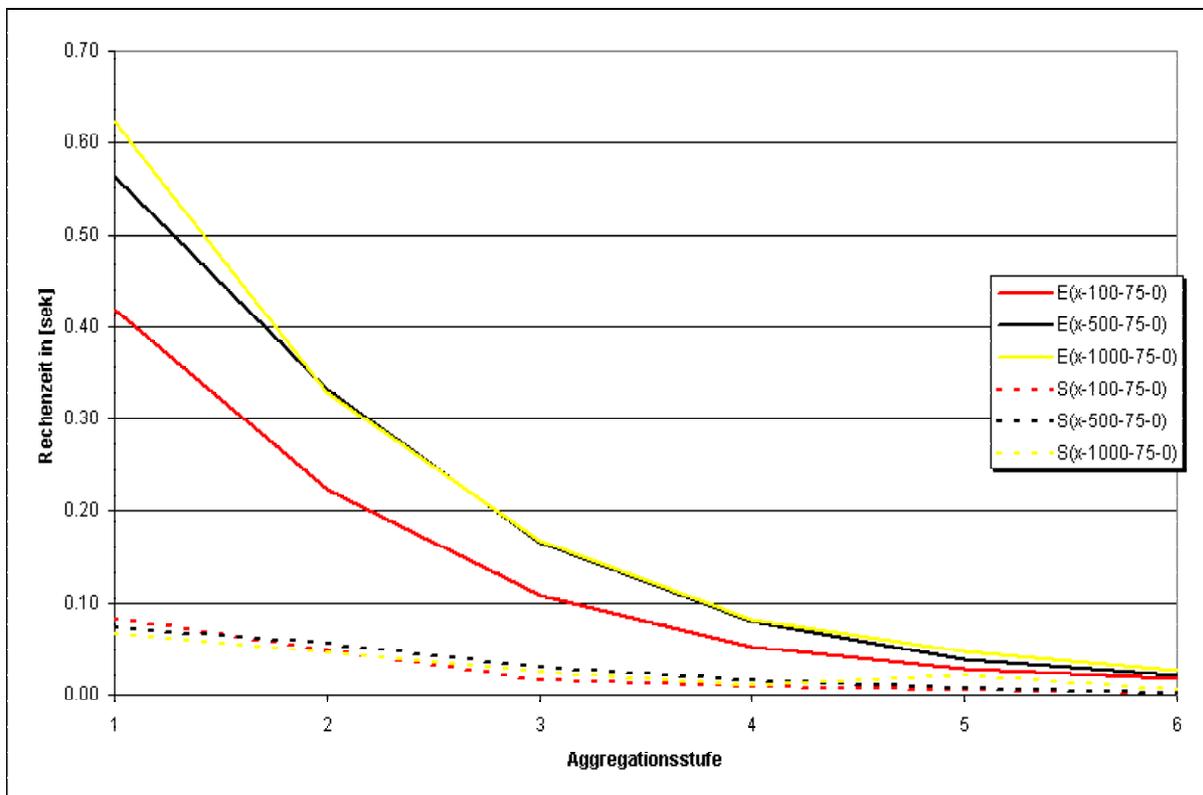


Abbildung 7.8: Geschätzte Erwartungswerte (E) und Standardabweichungen (S) der Rechenzeit pro Simulationslauf (Variantengruppe x-y-75-0)

Eine Analyse weiterer Messdaten der Variantengruppen sowie eine Betrachtung des Modells SAMBA legt für die beiden zuletzt genannten Aussagen folgende Erklärungen nahe:

Die festgestellte absolute Zunahme der geschätzten Erwartungswerte der Rechenzeit bei Verringerung der **Treffwahrscheinlichkeit** und gleichzeitiger Beibehaltung der restlichen Kenngrößen findet eine Entsprechung in der gleichzeitigen Zunahme der geschätzten Erwartungswerte der Gefechtsdauer (vgl. Abbildung 7.9). Dieser Zusammenhang erklärt sich aufgrund der in SAMBA verwendeten Modellierung des Abnutzungsprozesses. Die *verringerte Treffwahrscheinlichkeit* führt dazu, dass es zu einer im Mittel deutlich höheren Zahl an Fehlschüssen kommt. Die aggregierten Gefechtselemente sind somit gezwungen, eine größere Zahl an Abnutzungszyklen zu durchlaufen, bis alle Einzelsysteme einer der beiden Parteien vernichtet sind. Diese erhöhte Zahl an Abnutzungszyklen resultiert aus Sicht des abgebildeten Gefechts zum Einen in nachvollziehbarer Weise in einer verlängerten Gefechtsdauer. Aus Sicht des Rechensystems führt sie zum Anderen zu einer ebenfalls erhöhten Zahl an Abnutzungsereignissen und damit zu einem erhöhten Verwaltungs- und Rechenaufwand. Die Kombination beider Faktoren ergibt schlussendlich bei Verringerung der Treffwahrscheinlichkeit und Beibehaltung der restlichen Kenngrößen die beobachtete Erhöhung des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit pro Simulationslauf.

Die beobachtete Zunahme der geschätzten Erwartungswerte der Rechenzeit durch Erhöhung der **Gefechtsdistanz** bei gleichzeitiger Beibehaltung der restlichen Kenngrößen resultiert dagegen offensichtlich nicht direkt aus der damit verbundenen Verringerung der modifizierten Entdeckungswahrscheinlichkeit²⁵⁶. Gegen diese Annahme spricht die Tatsache, dass die ermittelten Ergebnisse bei Erhöhung der Gefechtsdistanz keine signifikante Erhöhung der Anzahl an – durch aggregierte Gefechtselemente – durchlaufenen Aufklärungszyklen aufweisen. Eine Auswertung der restlichen Simulationsergebnisse lässt somit vermuten, dass die Erhöhung des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit bei Erhöhung der Gefechtsdistanz primär aus dem erhöhten algorithmischen Aufwand für die Berechnung der modifizierten Entdeckungswahrscheinlichkeit bei einer Gefechtsdistanz von 500 m resultiert. Die Feststellung, dass die beobachtete Erhöhung mit steigender Aggregationsstufe immer kleiner ausfällt, unterstützt diese Vermutung zusätzlich, da eine steigende Aggregationsstufe stets dazu führt, dass nur für eine geringere Anzahl an aggregierten Gefechtselementen individuelle Aufklärungszyklen simuliert werden müssen. Eine geringere Anzahl an zu simulierenden Aufklärungszyklen bedeutet jedoch für jeden Simulationslauf ebenfalls eine verminderte Nutzung des Algorithmus zur Berechnung der modifizierter Entdeckungswahrscheinlichkeiten. Der Komplexitätsunterschied für die verschiedenen Gefechtsdistanzen kann somit nur noch in einer geringeren Zahl an Fällen zum Tragen kommen und wirkt sich deshalb auch nur in abgeschwächter Form auf eine Erhöhung der geschätzten Erwartungswerte der Rechenzeit aus.

²⁵⁶ vgl. Kapitel 6.1.4.2, S. 133ff

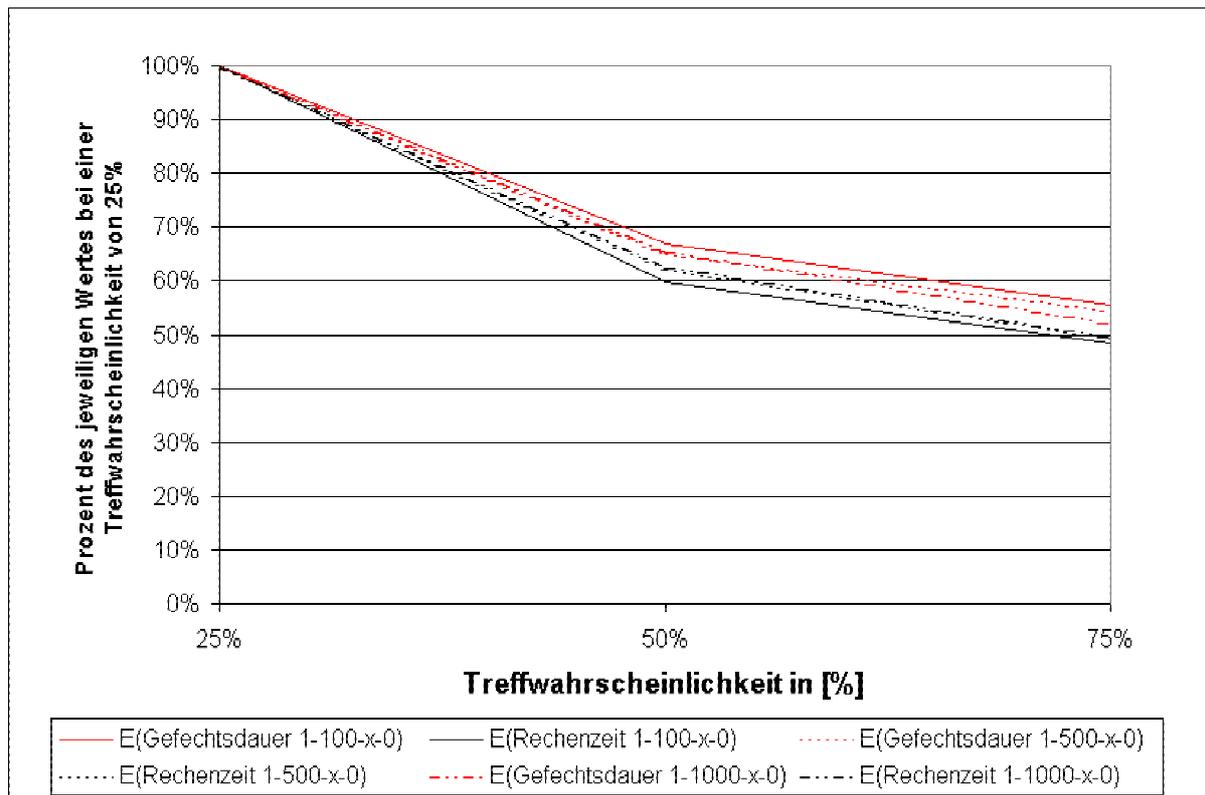


Abbildung 7.9: Geschätzte Erwartungswerte der Rechenzeit pro Simulationslauf und Gefechtsdauer (in Prozent des Wertes bei Treffwahrscheinlichkeit 25%)

Für die Bewertung des Rechenzeitverhaltens von zentralem Interesse ist selbstverständlich die Auswirkung einer Veränderung der Aggregationsstufe. Zu diesem Zweck bietet es sich an, den Verlauf der geschätzten Erwartungswerte für die Rechenzeit pro Simulationslauf – unabhängig von den gewählten Ausprägungen der restlichen Kenngrößen – einzig in Abhängigkeit von der jeweiligen Aggregationsstufe zu betrachten. Ferner erscheint es sinnvoll, den jeweils auf den Aggregationsstufen 2 bis 6 geschätzten Erwartungswert als prozentualen Anteil des Wertes der Aggregationsstufe 1 auszudrücken (vgl. Abbildung 7.10), um so einen direkten Vergleich der aggregationsabhängigen Veränderungen zu ermöglichen.

Die Auswertung der dadurch erhaltenen Zahlen erlaubt zum Einen die Feststellung, dass eine Erhöhung der Aggregationsstufe stets zu einer Verringerung des geschätzten Erwartungswertes sowie der Standardabweichung der Rechenzeit pro Simulationslauf führt. Darüber hinaus kann weiterhin festgestellt werden, dass unabhängig von der jeweils betrachteten Variante des Grundszenars – und damit dem ursprünglichen Niveau des auf Aggregationsstufe 1 geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit – der durch Erhöhung der Aggregation zu erwartende prozentuale Rechenzeitgewinn grundsätzlich nur von den beiden Aggregationsstufen abhängig ist, zwischen denen gewechselt wird.²⁵⁷ Diese Feststellung stützt offensichtlich die in Kapitel 5.2 theoretisch gemachten Überlegungen zum Rechenzeitverhalten der aggregierten Ab-

²⁵⁷ Auf eine Diskussion der Ursachen dieser beiden Effekte wird hier bewusst verzichtet, da eine solche bereits ausführlich in Kapitel 5.2, S. 116ff stattgefunden hat.

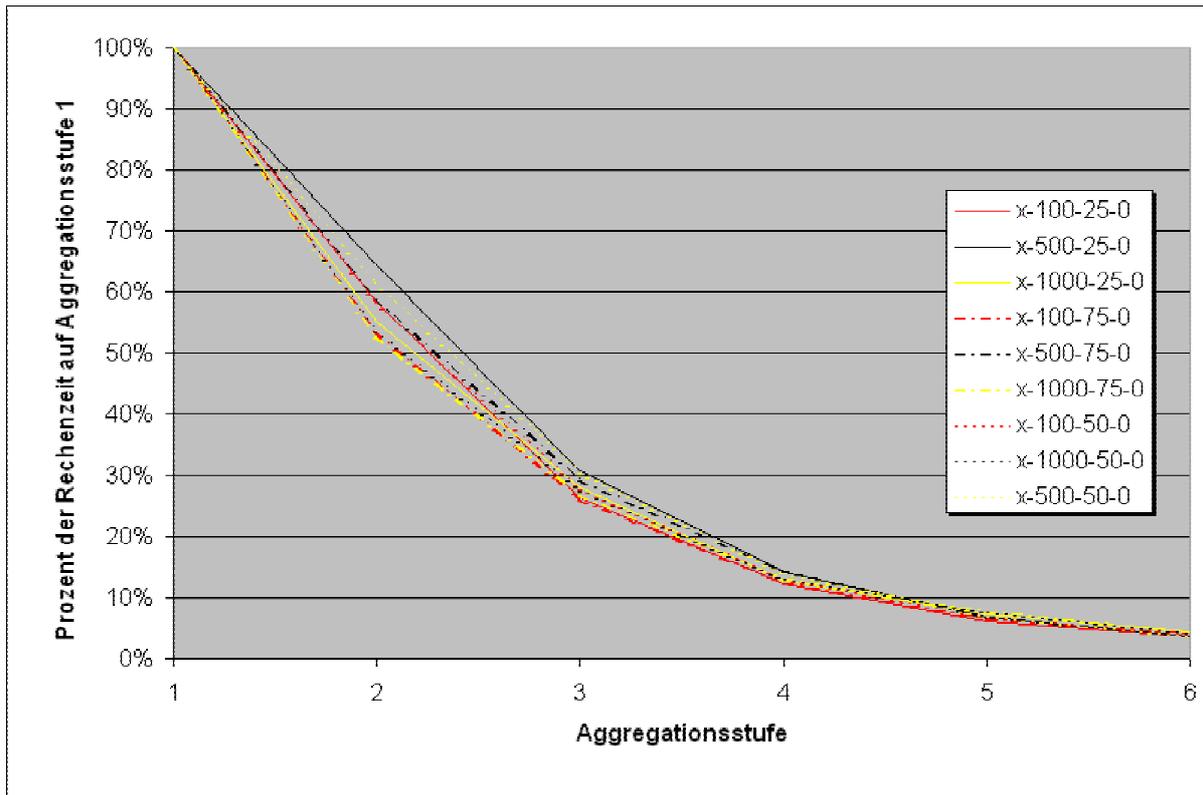


Abbildung 7.10: Geschätzte Erwartungswerte der Rechenzeit pro Simulationslauf (als Prozent des Wertes der Aggregationsstufe 1)

7.2.4 Konsistenzbewertung bezüglich der Gewinnhäufigkeit

Betrachtet man die ermittelten Daten mit Blick auf die Bewertungsgrößen der relativen **Gewinnhäufigkeiten** der Partei Blau bzw. Rot, so lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die jeweilige relative Gewinnhäufigkeit der Parteien Blau und Rot erfährt durch die Variationen des Grundszenars bezüglich *Gefechtsdistanz* und *Treffwahrscheinlichkeit* keine signifikante Veränderung.
- Eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* bzw. eine Veränderung des *Feuerkoordinierungsgrades* führt ebenfalls nicht zu einer signifikanten Veränderung der relativen Gewinnhäufigkeit.

Aufgrund der Tatsache, dass alle Variationen des Grundszenars bezüglich der Parteien Blau und Rot im Rahmen dieser Versuchsreihe stets symmetrisch vorgenommen wurden, war mit einer signifikanten Veränderung der ermittelten Gewinnhäufigkeiten nicht zu rechnen.

Die Aggregation sowie die damit verbundene Einführung bzw. Variation des Feuerkoordinierungsgrades als zusätzlichen Parameter im aggregierten Fall ändert daran nichts.

Zur Absicherung dieser Aussagen wurden die ermittelten Daten jeder Grundszenarvariante einem χ^2 -Anpassungstest²⁵⁸ auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ unterzogen. Die dabei getesteten Hypothesen lauten:

H_0 : Beide Parteien verfügen über die gleiche Gewinnwahrscheinlichkeit, d.h. ein einzelner Simulationslauf endet jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % mit einem Sieg von Blau bzw. Rot.

H_1 : Die Parteien Blau und Rot verfügen nicht über die gleiche Gewinnwahrscheinlichkeit.

Auf dem geforderten Signifikanzniveau ergab die Durchführung des Tests für jede Variante, dass die genannte Nullhypothese nicht verworfen werden muss.

²⁵⁸ Eine Beschreibung der Vorgehensweise beim χ^2 -Anpassungstest findet sich z.B. in [Rinne 95], S. 410f

7.2.5 Konsistenzbewertung bezüglich der Gefechtsdauer

7.2.5.1 Grundsätzliche Aussagen

Eine Auswertung der ermittelten Daten bezüglich des geschätzten Erwartungswertes der **Gefechtsdauer** wurde bei der Bewertung des Rechenzeitverhaltens bereits teilweise vorweggenommen. Insgesamt lassen sich nach detaillierter Betrachtung die folgenden Aussagen treffen.

Im nicht aggregierten Fall:

- Eine Erhöhung der *Gefechtsdistanz* führt im nicht aggregierten Fall zuerst zu einer tendenziellen Verringerung und erst bei größeren Distanzen zu einer gemäßigten Erhöhung des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer (vgl. Kapitel 7.2.5.3).
- Eine Erhöhung der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* führt im nicht aggregierten Fall zu einer Verringerung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer (vgl. Kapitel 7.2.5.4).

Im aggregierten Fall:

- Im aggregierten Fall bleiben die geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer bei Erhöhung der *Gefechtsdistanz* praktisch konstant (vgl. Kapitel 7.2.5.3).
- Im aggregierten Fall führt die Erhöhung des *Feuerkoordinierungsgrades* selbst auf hohen Aggregationsstufen zu keiner signifikante Veränderung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer (vgl. Kapitel 7.2.5.2).
- Im aggregierten Fall führt eine Erhöhung der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* zu einer Verringerung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer (vgl. Kapitel 7.2.5.4).
- Eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* führt nicht zu einer signifikanten Veränderung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen (vgl. Kapitel 7.2.5.3).

7.2.5.2 Analyse der Auswirkungen des Feuerkoordinierungsgrades

Eine Analyse der gewonnenen Daten am Beispiel der Variantengruppe x-100-25-y und x-100-75-y (vgl. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12) zeigt, dass im aggregierten Fall eine Veränderung des **Feuerkoordinierungsgrades** nur zu geringen Veränderungen der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer führt. Betrachtet man diese Zahlen mit Blick auf die gewonnenen Werte der Aggregationsstufe 1, d.h. der Ebene der Einzelsystemabbildung, so erkennt man, dass diese Veränderungen stets deutlich unterhalb des dort geschätzten Wertes der Standardabweichung der Gefechtsdauer bleiben. Für die Beurteilung der Konsistenz der Abbildung können die durch die Variation des Feuerkoordinierungsgrades verursachten Schwankungen des geschätzten Erwartungswertes und der geschätzten Standardabweichung der Gefechtsdauer somit als unbedeutend beurteilt werden.

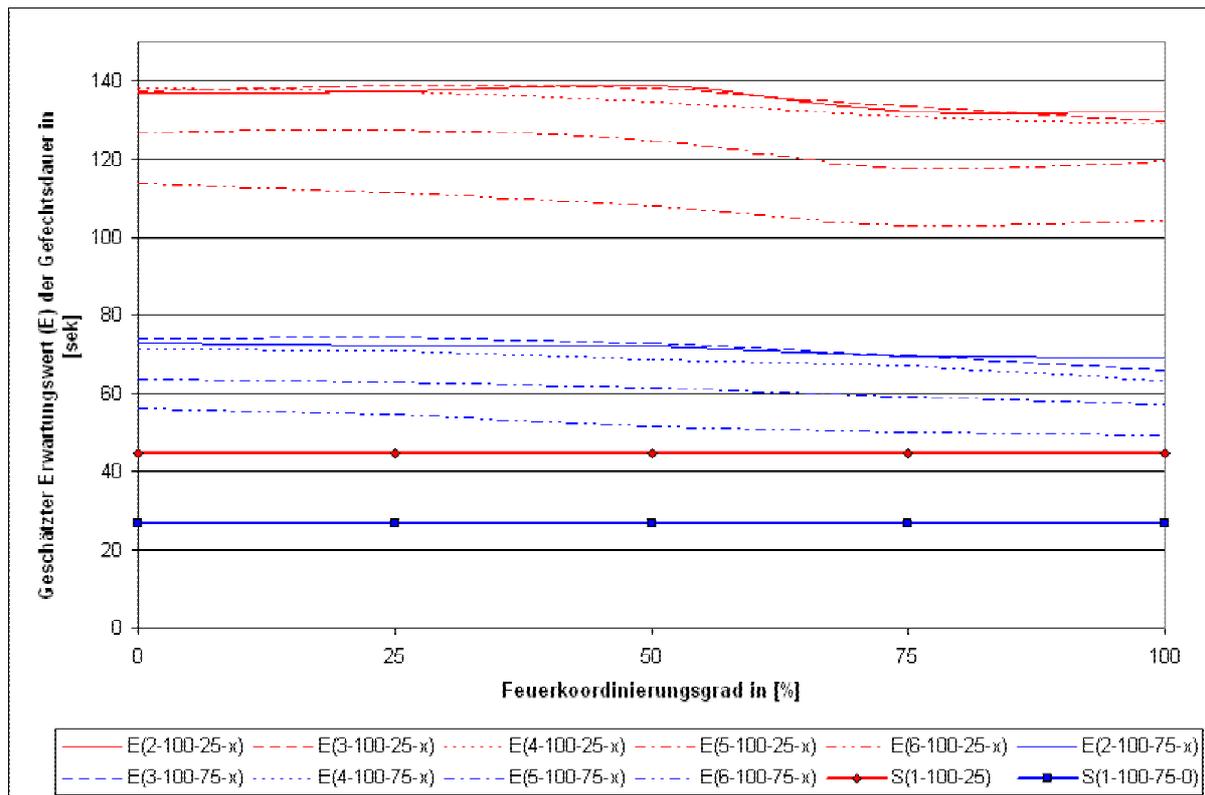


Abbildung 7.11: Geschätzter Erwartungswert der Gefechtsdauer in Abhängigkeit von dem Feuerkoordinierungsgrad (Variantengruppen x-100-25-y und x-100-75-y)

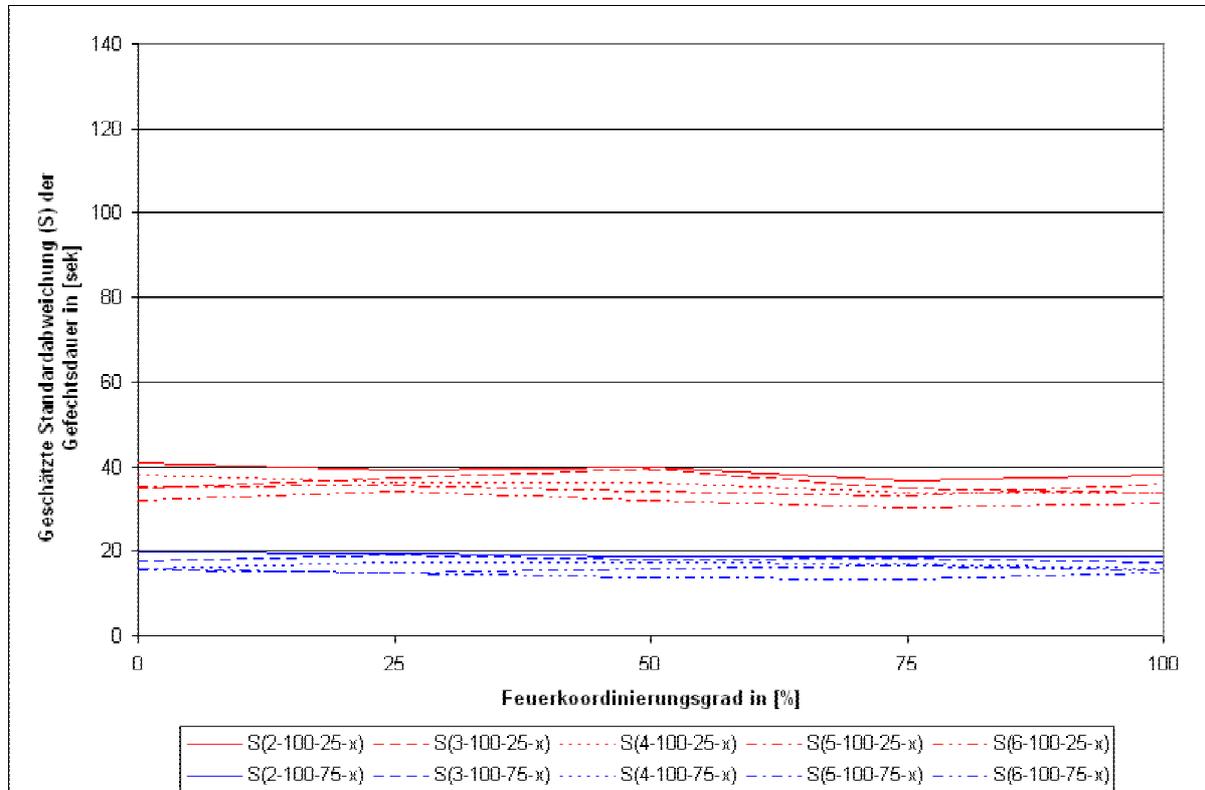


Abbildung 7.12: Geschätzte Standardabweichung der Gefechtsdauer in Abhängigkeit von dem Feuerkoordinierungsgrad (Variantengruppen x-100-25-y und x-100-75-y)

7.2.5.3 Analyse der Auswirkungen der Gefechtsdistanz und der Aggregationsstufe

Der Verlauf des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer in Abhängigkeit von einer Erhöhung der **Gefechtsdistanz** (vgl. Abbildung 7.13) erscheint auf den ersten Blick als widersprüchlich, da bei einer Erhöhung der Gefechtsdistanz von 100m auf 500m eine tendenzielle Abnahme zu beobachten ist. Erst bei einer erneuten Erhöhung der Gefechtsdistanz von 500m auf 1.000m erfolgt eine deutliche Erhöhung dieses Wertes auch gegenüber dem Niveau der 100m Varianten. Eine Analyse der ermittelten Zahlen legt nahe, dass die Erklärung für diese Beobachtung in dem in SAMBA verwendeten Entdeckungsmodell sowie der Gliederung des Abnutzungsprozesses liegt. Die zu beobachtende anfängliche Abnahme des geschätzten Erwartungswertes liegt zwar deutlich unterhalb der geschätzten Standardabweichung und kann somit grundsätzlich für die Konsistenzuntersuchung als nicht signifikant bewertet werden. Sie ist jedoch an dieser Stelle trotzdem von Interesse, da sie innerhalb anderer Bewertungsgrößen eine deutlichere Entsprechung findet.

Gegenüber der Variantengruppe 1-100-x-0 weisen die Messdaten der Variantengruppe 1-500-x-0 einen deutlich geringeren geschätzten Erwartungswert der Anzahl an Doppelbekämpfungen einer Partei pro Simulationslauf bei einem praktisch konstant bleibenden geschätzten Erwartungswert der Zahl durchgeführter Aufklärungsprozesse pro Partei und Simulationslauf auf. Grundlegende Voraussetzung für das Auftreten von Doppelbekämpfungen ist jedoch offensichtlich die zumindest teilweise Identität der Spektren entdeckter potentieller Ziele bei den Einzelsystemen einer Partei.

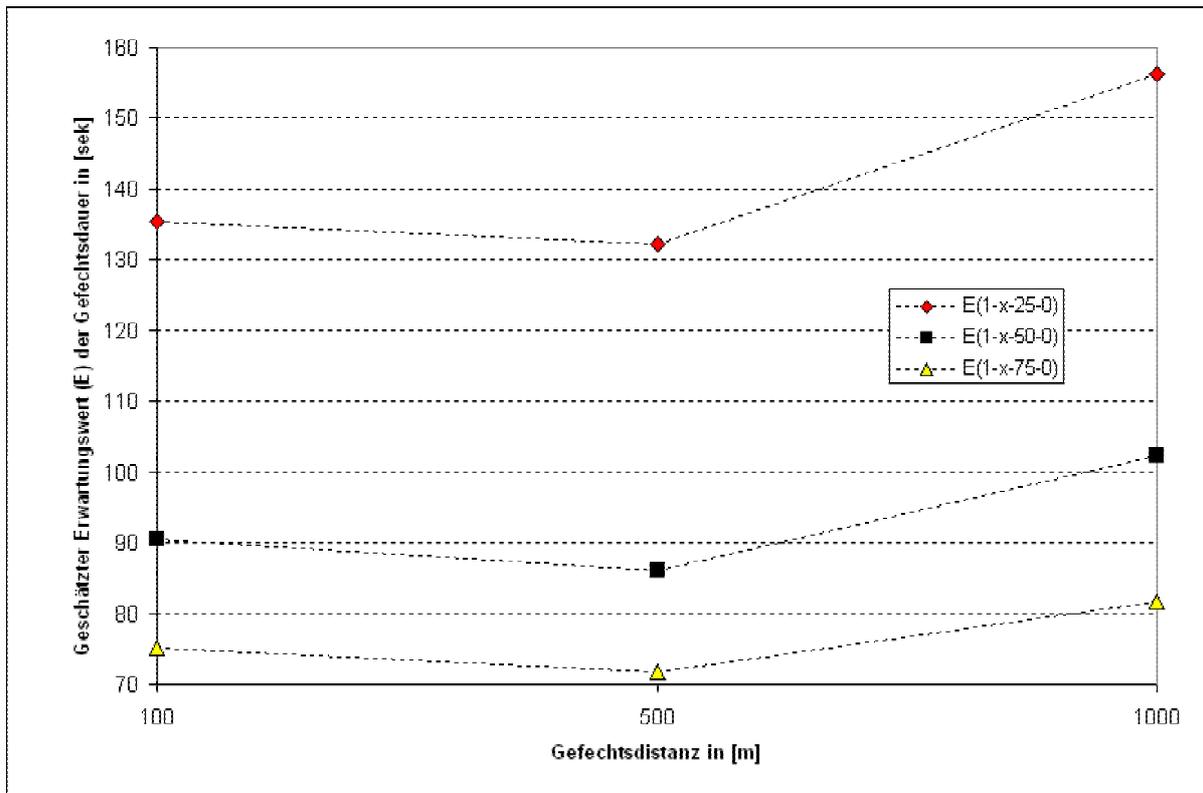


Abbildung 7.13: Verlauf der geschätzten Erwartungswerte der Gefechtsdauer (Variantengruppe 1-x-y-0)

Diese Voraussetzung wird bei einer Gefechtsdistanz unter 150m jedoch voll erfüllt, da hier die modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit aufgrund der gewählten Leistungsdaten der

Einzelsysteme stets 100% (vgl. Abbildung 7.14) beträgt und gleichzeitig das gewählte Gelände Sichtverbindungen zwischen allen Einzelsystemen beider Parteien erlaubt. Die aufklärenden Einzelsysteme einer Partei entdecken somit innerhalb des ersten Aufklärungsvorgangs stets alle erleideraktiven feindlichen Einzelsysteme, so dass sie für alle anschließende Ziel-auswahlphasen²⁵⁹ über ein völlig identisches Spektrum potentieller Ziele verfügen. Verbunden mit der Tatsache, dass innerhalb der beschriebenen Situation des Grundszenars und seiner Varianten entdeckte Einzelsysteme nur dann wieder aus dem Aufklärungsergebnis entfernt werden, wenn sie ausgefallen bzw. im Zustand nicht erleideraktiv sind,²⁶⁰ führt dies dazu, dass bei den Einzelsystemen in den allermeisten Fällen ein nicht leeres Aufklärungsergebnis vorliegt, so dass sich an einen Aufklärungsprozesse ein Abnutzungsprozess anschließen kann. Für die Dauer des simulierten Gefechts ist somit primär nur noch die Zeit ausschlaggebend, welche benötigt wird, um die entdeckten Einzelsysteme vollständig zu vernichten und nicht die Zeit, welche im Falle einer geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit damit verbracht würde, Ziele für eine Abnutzung erst zu entdecken.

Die aus der vollständigen Identität der Zielspektren resultierende erhöhte Möglichkeit zum Auftreten von Doppelbekämpfungen führt jedoch augenscheinlich dazu, dass für die völlige Vernichtung einer Partei mehr Abnutzungsprozesse notwendig werden, so dass die Gefechtsdauer tendenziell ansteigt.

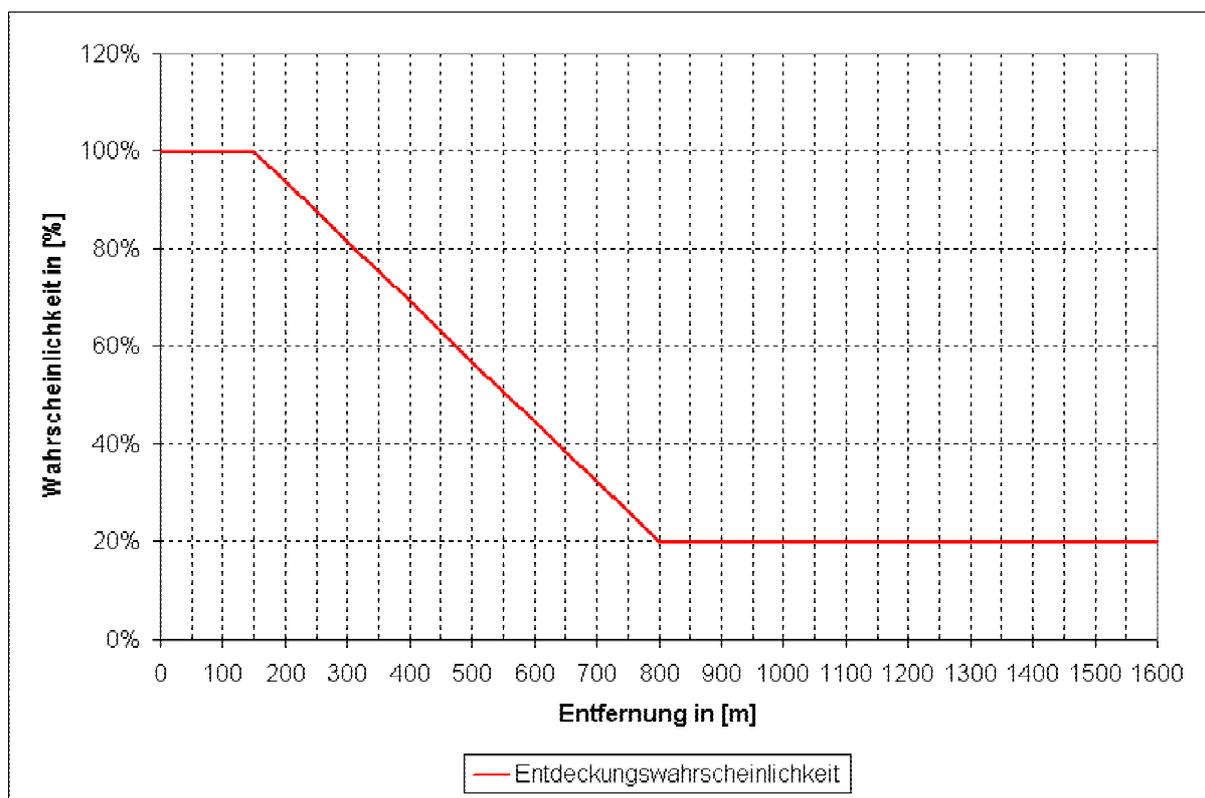


Abbildung 7.14: Verlauf der modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit für den Einzelsystemtyp „Schütze“

²⁵⁹ vgl. Kapitel 6.1.4.3

²⁶⁰ Innerhalb des Aufklärungsmodells (vgl. Kapitel 6.1.4.2, Nr. 3) von SAMBA werden einmal entdeckte Einzelsysteme wieder vergessen, wenn diese eine Bewegung ausführen, welche die Sichtverbindung zwischen ihnen und dem aufklärenden Einzelsystem stört bzw. dann, wenn sie sich zum Zeitpunkt des folgenden Aufklärungsprozesses im Zustand ausgefallen oder nicht erleideraktiv befinden. Der erste Fall ist im gewählten Grundszenar und seinen Variationen jedoch offensichtlich nicht möglich.

Bei einer Gefechtsdistanz von 500m beträgt die modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit dagegen nur noch etwa 57% (vgl. Abbildung 7.14), so dass die individuellen Zielspektren der Einzelsysteme sich gerade zu Beginn eines simulierten Gefechts deutlich voneinander unterscheiden können. Dies erklärt den gegenüber der Variantengruppe 1-100-x-0 gesunkenen geschätzten Erwartungswert der Anzahl an Doppelbekämpfungen einer Partei pro Simulationslauf. Das der geschätzte Erwartungswert der Zahl an durchgeführten Aufklärungsprozessen pro Partei und Simulationslauf dagegen bei der Erhöhung der Gefechtsdistanz von 100m auf 500m praktisch konstant bleibt, resultiert aus der Tatsache, dass nun nicht die Anzahl an durchgeführten Abnutzungsprozessen als primärer Faktor die Dauer des simulierten Gefechts bestimmt. Vielmehr tritt – wiederum gerade zu Beginn eines Gefechts – vermehrt der Fall auf, dass Einzelsysteme nach Durchführung eines Aufklärungsprozesses nicht über zumindest ein potentiell Ziel für einen anschließenden Abnutzungsprozess verfügen, so dass sich direkt ein weiterer Aufklärungsprozess anschließt. Während im Verlauf eines Gefechts der Variantengruppe 1-100-x-0 die Einzelsysteme praktisch kontinuierlich einen Wechsel von Aufklärungs- und Abnutzungsprozessen durchführen und dabei eine erhöhte Zahl an Doppelbekämpfungen verursachen, verbringen Einzelsysteme im Verlauf eines Gefechts der Variantengruppe 1-500-x-0 scheinbar erst eine gewisse Zahl aufeinanderfolgender Aufklärungsprozesse damit, ein potentiell Ziel für einen Abnutzungsprozess zu entdecken. Ist dieses gefunden und wird somit ein Abnutzungsprozess ausgelöst, kommt es aufgrund der stärker divergierenden Zielspektren der Einzelsysteme einer Partei jedoch zu einer geringeren Anzahl an Doppelbekämpfungen.

Die ermittelten Daten der mit den beiden Variantengruppen durchgeführten Simulationsläufe legen in diesem Zusammenhang den Schluss nahe, dass bei dem Übergang von einer Gefechtsdistanz von 100m auf 500m der Zeitgewinn, welcher aus dieser beschriebenen Verringerung der Anzahl an Doppelbekämpfungen resultiert, den zusätzlichen Zeitbedarf für die Durchführung von Aufklärungsprozessen ohne anschließenden Abnutzungsprozess tendenziell übersteigt, so dass dadurch die geringfügige Verringerung des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer zustande kommt.

Bei einer Gefechtsdistanz von 1.000m beträgt schließlich die modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit nur noch 20% und die Messdaten der Variantengruppe 1-1000-x-0 lassen neben einer weiteren Verringerung des geschätzten Erwartungswertes der Doppelbekämpfungen pro Partei und Simulationslauf vor allem einen deutlichen Anstieg des geschätzten Erwartungswertes der pro Partei und Simulationslauf durchgeführten Aufklärungsprozesse erkennen. In Kombination mit dem nun ebenfalls zu beobachtenden Anstieg des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer lassen diese Daten die Annahme zu, dass die bereits beschriebenen Effekte sich auch bei dem Übergang von einer Gefechtsdistanz von 500m auf 1.000m fortsetzen, jedoch nun der zusätzliche Zeitaufwand für die erhöhte Anzahl an Aufklärungsprozessen den Zeitgewinn durch die weitere Reduzierung der Zahl der Doppelbekämpfungen übersteigt.²⁶¹

Im aggregierten Fall, d.h. auf den Aggregationsstufen 2 bis 6, führt eine Erhöhung der Gefechtsdistanz dagegen zu keiner signifikanten Veränderung des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer, wie sich an dem Verlauf der Werte der Variantengruppen x-y-25-0 (vgl. Abbildung 7.15), x-y-50-0 (vgl. Abbildung 7.16) sowie x-y-75-0 (vgl. Abbildung 7.17) nach-

²⁶¹ Im Rahmen zukünftiger Arbeiten könnte es von Interesse sein, diese Problematik genauer zu untersuchen und den Distanzbereich zu ermitteln, in welchem der zusätzliche Zeitbedarf für Aufklärungsprozesse den Zeitgewinn durch eine geringere Anzahl notwendiger Abnutzungsprozesse überschreitet und zu einem Anstieg der Gefechtsdauer führt. Die vorliegende Arbeit verzichtet jedoch auf entsprechende Experimente, da hier die Auswirkung der Aggregation im Zentrum der Betrachtungen stehen.

vollziehen lässt. Diese Beobachtung ist vor dem Hintergrund der Argumentation im nicht aggregierten Fall zu erklären, wenn man sich die Bedeutung der Entdeckungswahrscheinlichkeit im aggregierten Fall genauer vor Augen führt. In dem Modell SAMBA wurde der Ansatz der einseitig individuellen Entdeckung²⁶² in seiner zweiten geschilderten Ausprägung gewählt, so dass die Entdeckungswahrscheinlichkeit somit nun die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit welcher alle aktiven Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes ein Einzelsystem eines feindlichen aggregierten Gefechtselementes entdecken. Die Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes verfügen also stets über ein identisches Zielspektrum und die Wahrscheinlichkeit, dass ein feindliches Einzelsystem entdeckt wird, hängt außer von der Gefechtsdistanz vor allem von der aktuellen Mächtigkeit des jeweils aufklärenden aggregierten Gefechtselementes ab. Mit zunehmender Aggregationsstufe steigt dabei der Einfluss der Mächtigkeit, so dass die Gefechtsdistanz von immer geringerer Bedeutung ist (vgl. Abbildung 7.18). Diese direkte Abhängigkeit der Entdeckungswahrscheinlichkeit von der aktuellen Mächtigkeit eines aufklärenden aggregierten Gefechtselementes, welche gerade auf höheren Aggregationsstufen zu einer Angleichung der Wahrscheinlichkeiten bei allen Gefechtsdistanzen führt, sowie die Tatsache, dass mit zunehmender Aggregationsstufe eine immer größer werdende Zahl an Einzelsystemen innerhalb eines aggregierten Gefechtselementes über ein identisches Zielspektrum verfügt, führt offensichtlich dazu, dass eine Veränderung der Gefechtsdistanz im aggregierten Fall nur eine geringe Auswirkung auf den geschätzten Erwartungswert der Gefechtsdauer besitzt.

Gleichzeitig lässt sich anhand dieser Betrachtungen (vgl. Abbildung 7.15 bis Abbildung 7.17) erkennen, dass eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* zu keiner im Sinne der verwendeten Definition signifikanten Veränderung des geschätzten Erwartungswertes sowie der Standardabweichung der Gefechtsdauer führt, da die beobachtenden Abweichungen stets deutlich unterhalb der geschätzten Standardabweichung des nicht aggregierten Falles bleiben. Für die Bewertung der Konsistenz in der Abbildung können diese Abweichungen – wie Eingangs bereits erwähnt – somit als unbedeutend bewertet werden, so dass zusammenfassend ein Vorliegen starker Konsistenz bezüglich der Bewertungsgröße der Gefechtsdauer festgestellt werden kann.

²⁶² vgl. Kapitel 5.1.4.2

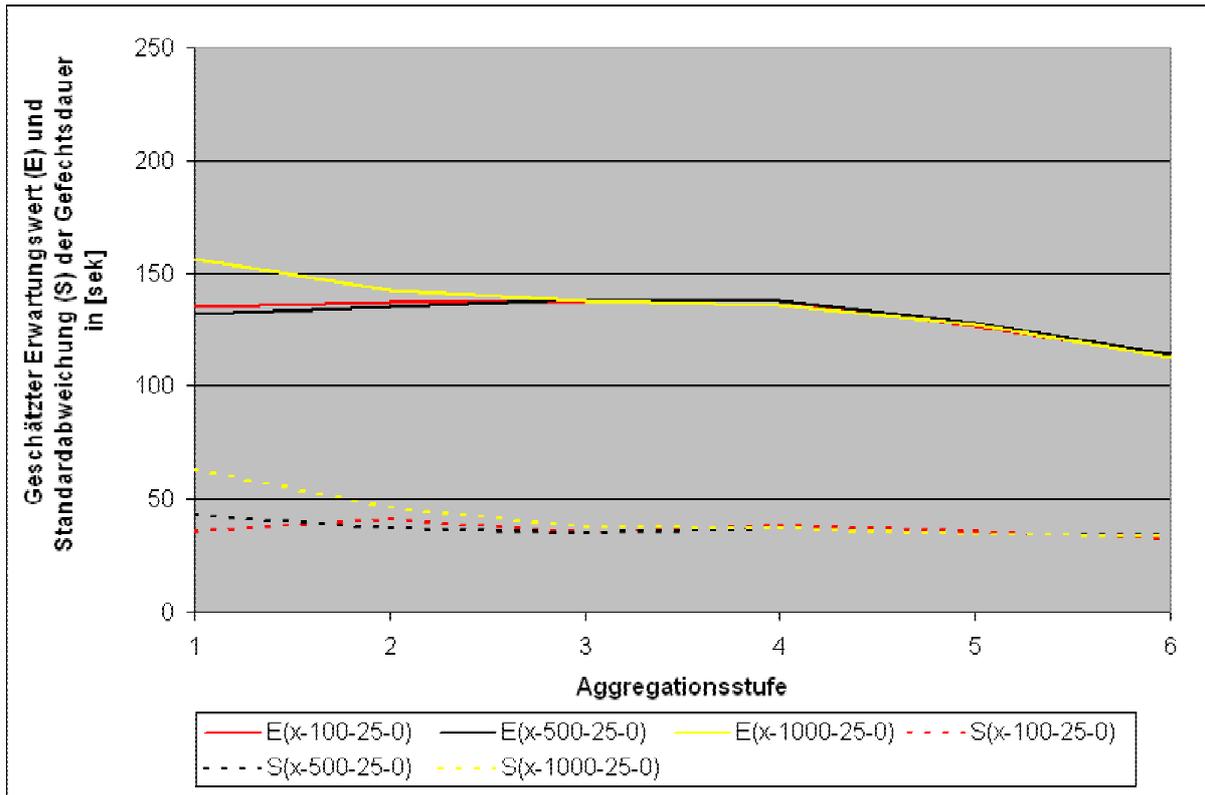


Abbildung 7.15: Geschätzter Erwartungswert und geschätzte Standardabweichung der Gefechtsdauer (Variantengruppe x-y-25-0)

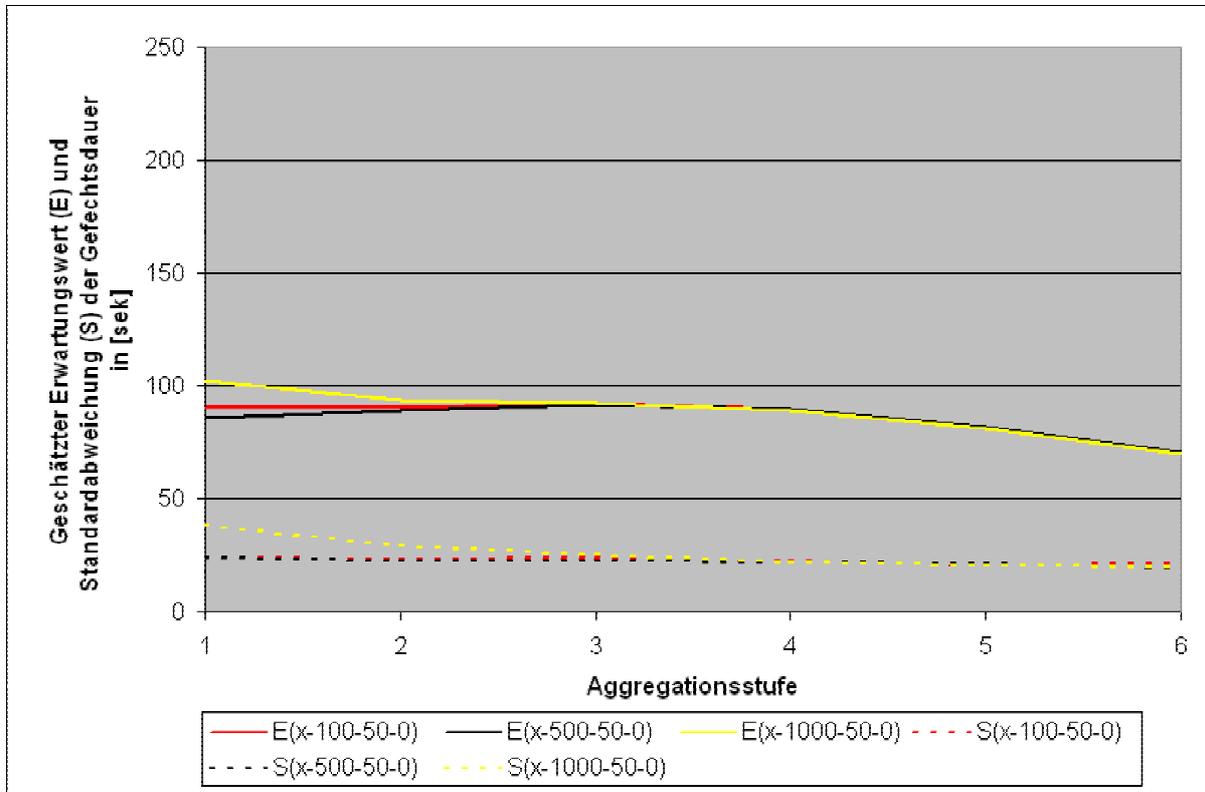


Abbildung 7.16: Geschätzter Erwartungswert und geschätzte Standardabweichung der Gefechtsdauer (Variantengruppe x-y-50-0)

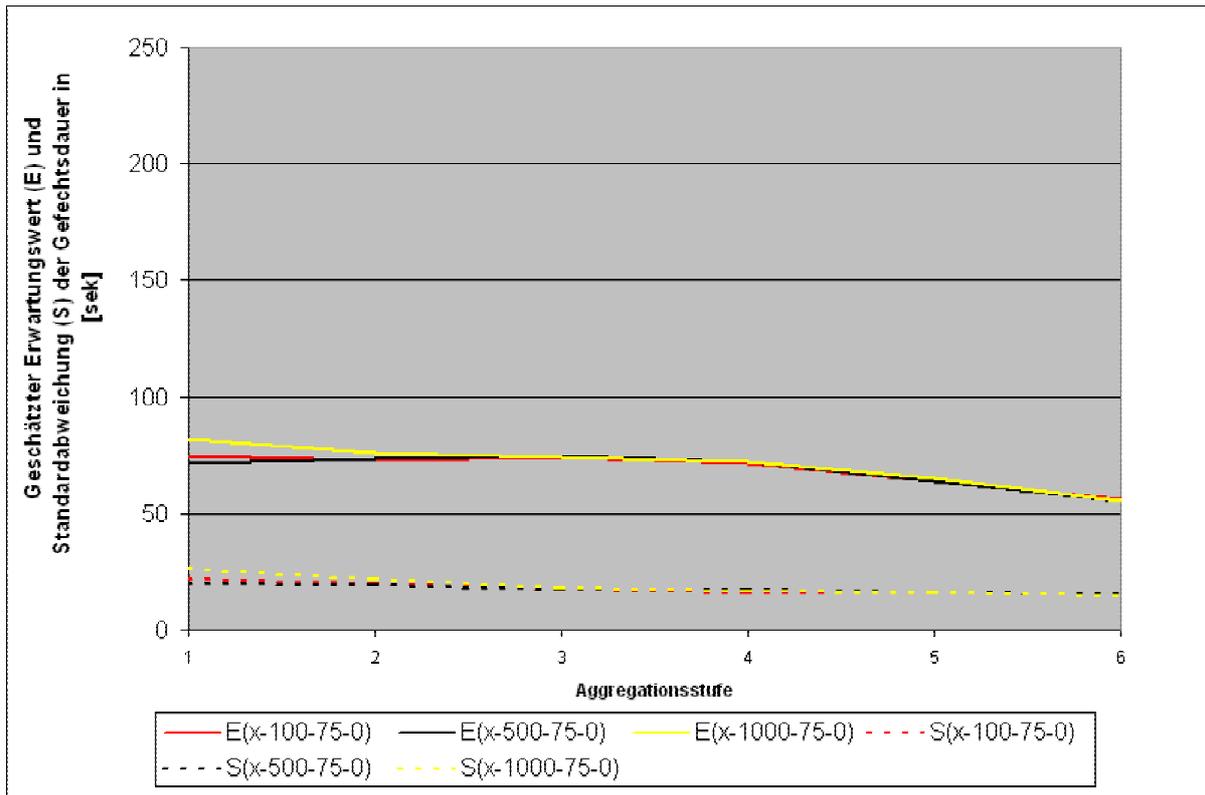


Abbildung 7.17: Geschätzter Erwartungswert und geschätzte Standardabweichung der Gefechtsdauer (Variantengruppe x-y-75-0)

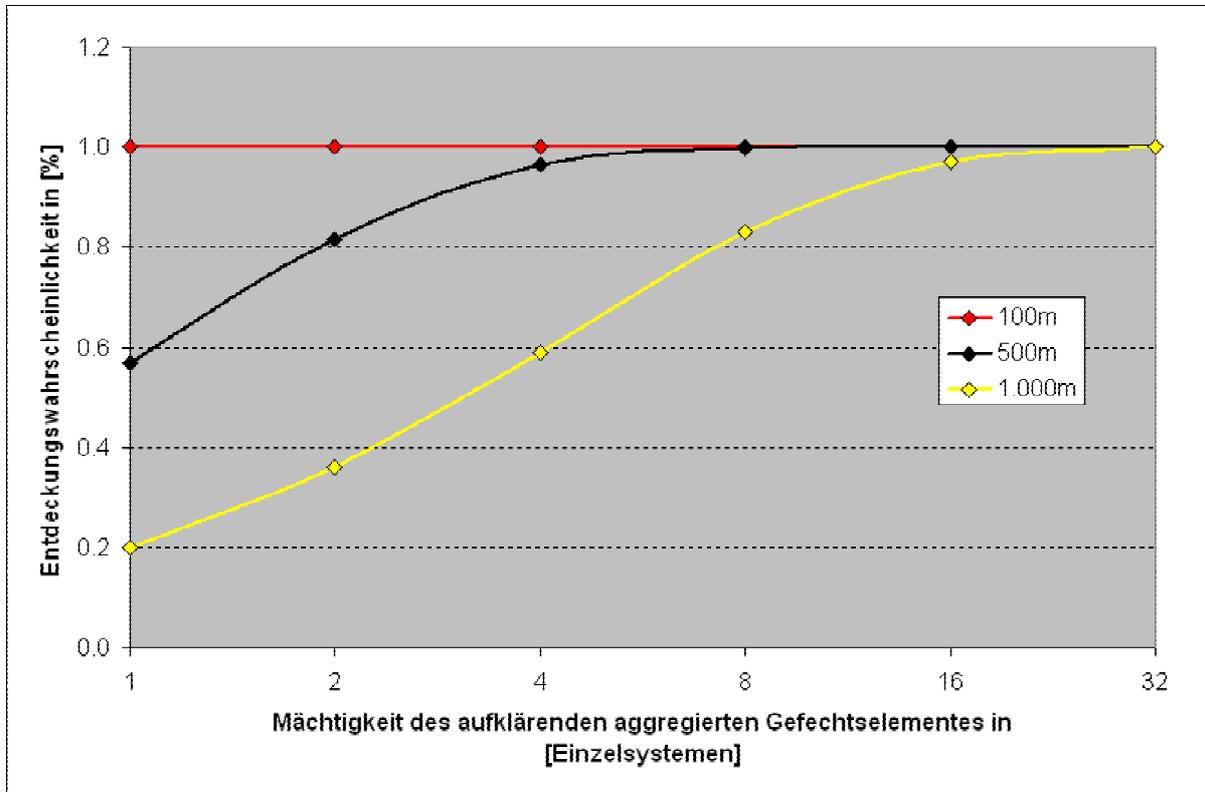


Abbildung 7.18: Wahrscheinlichkeit eines aggregierten Gefechtselementes ein Einzelsystem zu entdecken (in Abhängigkeit von Gefechtsdistanz und Mächtigkeit)

7.2.5.4 Analyse der Auswirkungen der Treffwahrscheinlichkeit

Im nicht aggregierten wie auch im aggregierten Fall ist bei Erhöhung der entfernungsunabhängigen **Treffwahrscheinlichkeit** eine Verringerung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer zu beobachten. Dieser Effekt lässt sich leicht nachvollziehen, da eine gesteigerte Treffwahrscheinlichkeit bei konstanter Vernichtungswahrscheinlichkeit dazu führt, dass während eines Simulationslaufes im Mittel weniger Fehlschüsse durch die Einzelsysteme abgegeben werden. Diese geringere Zahl an Fehlschüssen resultiert notwendigerweise in einer ebenfalls geringeren Zahl an Abnutzungsprozessen, welche durch die Einzelsysteme bzw. aggregierten Gefechts-elemente einer Partei durchlaufen werden müssen, bevor die gegnerische Partei vernichtet ist und somit schlussendlich in einer geringeren Gefechtsdauer.

Für die Beurteilung der Konsistenz in der Abbildung ist jedoch ausschlaggebend, ob die Veränderung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Gefechtsdauer im aggregierten Fall nicht nur an sich sondern auch – gegenüber der Ebene der Einzelsystemabbildung – in vergleichbaren Größenordnungen auftritt. Betrachtet man am Beispiel der Variantengruppen x-100-y-0 (vgl. Abbildung 7.19) und x-100-y-100 (vgl. Abbildung 7.20) die relative Abnahme des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer, welche sich bei steigender Treffwahrscheinlichkeit gegenüber einer Ausgangstreffwahrscheinlichkeit von 25% im nicht aggregierten und aggregierten Fall ergibt, so lässt sich feststellen, dass dies auf allen Aggregationsstufen der Fall ist.

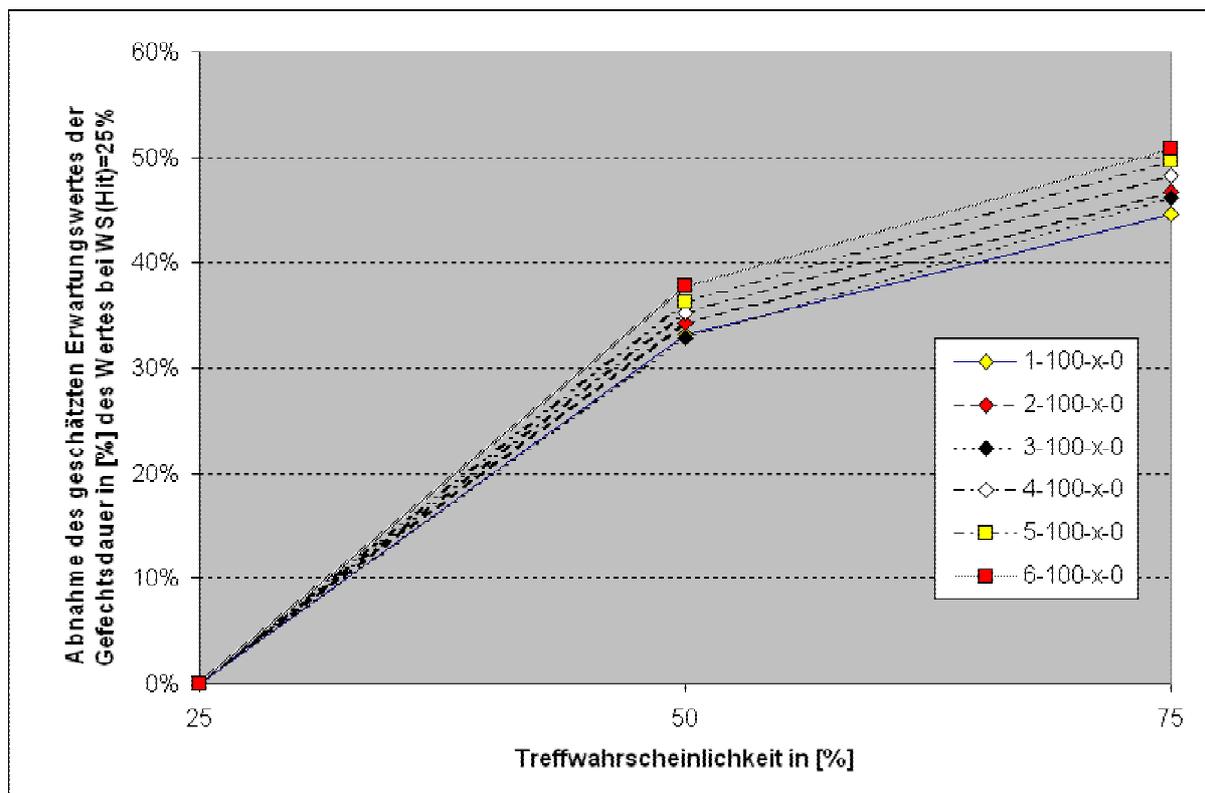


Abbildung 7.19: Abnahme des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer bei steigender Treffwahrscheinlichkeit (Variantengruppe x-100-y-0)

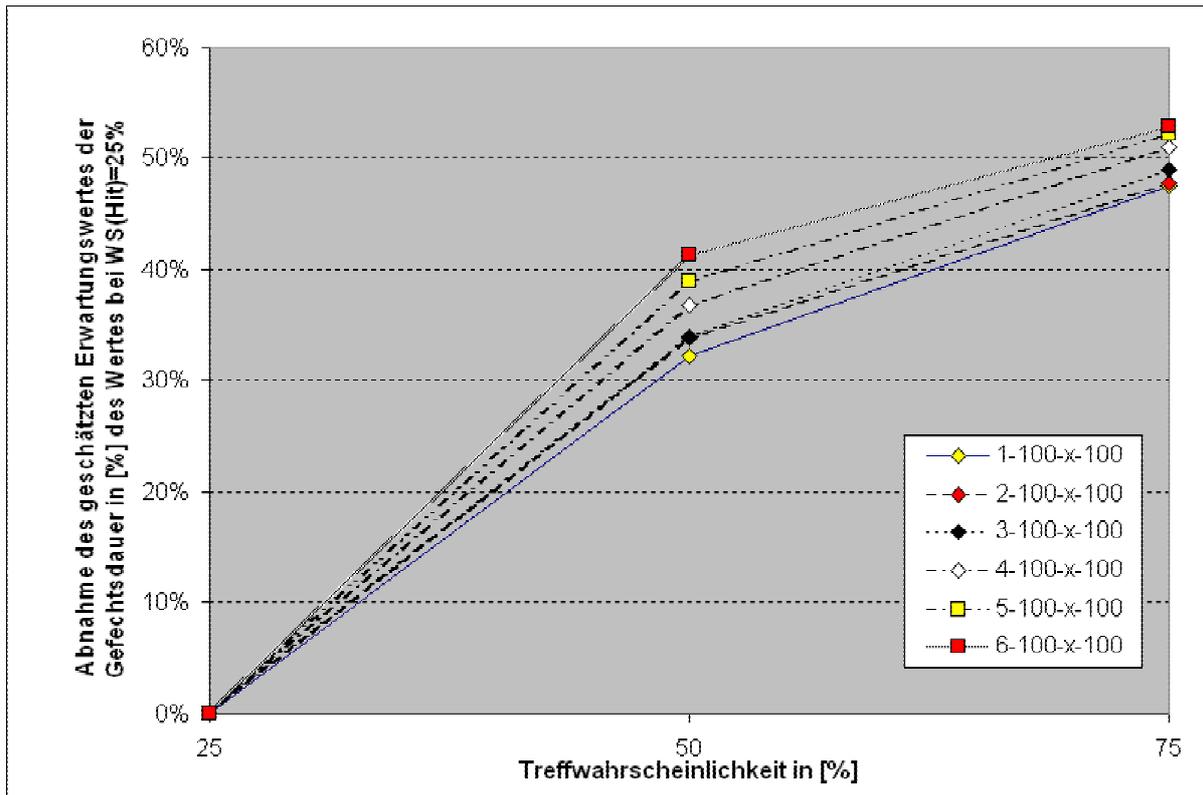


Abbildung 7.20: Abnahme des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer bei steigender Treffwahrscheinlichkeit (Variantengruppe x-100-y-100)

7.2.5.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die aggregierte Abbildung die Effekte, welche bezüglich des geschätzten Erwartungswertes der **Gefechtsdauer** durch Variation der Kenngrößen Gefechtsdistanz und Treffwahrscheinlichkeit auf der nicht aggregierten Ebene der Einzelsystemabbildung zu beobachten sind, konsistent wiedergibt. Die Erhöhung der Aggregationsstufe an sich sowie die Einführung bzw. Variation des Feuerkoordinierungsgrades als zusätzlicher Kenngröße im aggregierten Fall führt ebenfalls nicht zu signifikanten Abweichungen der dann geschätzten Erwartungswerte bzw. Standardabweichungen bezüglich der Werte der nicht aggregierten Ebene der Einzelsystemabbildung.

Die aufgetretenen Abweichungen zwischen nicht aggregiertem und aggregiertem Fall liegen stets deutlich unterhalb der im nicht aggregierten Fall geschätzten Standardabweichung und können damit grundsätzlich als vernachlässigbar bewertet werden.

In der vorliegenden Versuchsreihe kann somit mit Blick auf die Bewertungsgröße der Gefechtsdauer bei Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips grundsätzlich von einem Vorliegen starker Konsistenz im Sinn der verwendeten Definition gesprochen werden.

7.2.6 Konsistenzbewertung bezüglich der Endstärke

7.2.6.1 Grundsätzliche Aussagen

Bezüglich der Bewertungsgröße der **Endstärke** der siegreichen Partei erlaubt eine Analyse der erhaltenen Daten sämtlicher Versuchsläufe die folgenden Aussagen:

- Eine Erhöhung der *Gefechtsdistanz* hat sowohl im nicht aggregierten als auch im aggregierten Fall keine signifikante Veränderung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei zur Folge.
- Die Erhöhung der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* führt sowohl im aggregierten als auch im nicht aggregierten Fall tendenziell zu einer Verringerung des geschätzten Erwartungswertes sowie der geschätzten Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei, welche jedoch bezüglich der Konsistenzbetrachtung als nicht signifikant zu bewerten sind (vgl. Kapitel 7.2.6.2).
- Die Erhöhung des *Feuerkoordinierungsgrades* im aggregierten Fall führt zu keiner signifikanten Veränderung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei (vgl. Kapitel 7.2.6.3).
- Die Erhöhung der *Aggregationsstufe* führt zu geringfügigen Schwankungen der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei, welche jedoch bezüglich der Konsistenzbetrachtung ebenfalls als nicht signifikant zu bewerten sind (vgl. Kapitel 7.2.6.3).

7.2.6.2 Analyse der Auswirkungen der Treffwahrscheinlichkeit

Betrachtet man die erhaltenen Messdaten im Detail, so lässt sich bei Variation der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* sowohl im nicht aggregierten als auch im aggregierten Fall eine tendenzielle Verringerung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei beobachten (vgl. Abbildung 7.21 und Abbildung 7.22). Dieser Effekt ist grundsätzlich logisch nachvollziehbar, da bei Anstieg der Treffwahrscheinlichkeit und konstanter Vernichtungswahrscheinlichkeit mit einer Verringerung der Anzahl an wirkungslos gebliebenen Schüssen und somit mit einem Anstieg der Ausfälle zu rechnen ist. Betrachtet man die tendenzielle Verringerung jedoch mit Blick auf die ebenfalls geschätzten Standardabweichungen, so lässt sich feststellen, dass die Verringerung des geschätzten Erwartungswertes bei einem Übergang von einer Treffwahrscheinlichkeit von 25% zu 75% deutlich unterhalb der geschätzten Standardabweichung bei 25% liegt. Die Variation weiterer Kenngrößen, wie etwa der Gefechtsdistanz bzw. des Feuerkoordinierungsgrades ändern an dieser grundsätzlichen Bewertung ebenfalls nichts.

Bezüglich ihrer Auswirkung auf die Konsistenzbewertung kann die beobachtete tendenzielle Verringerung somit als nicht signifikant betrachtet werden.

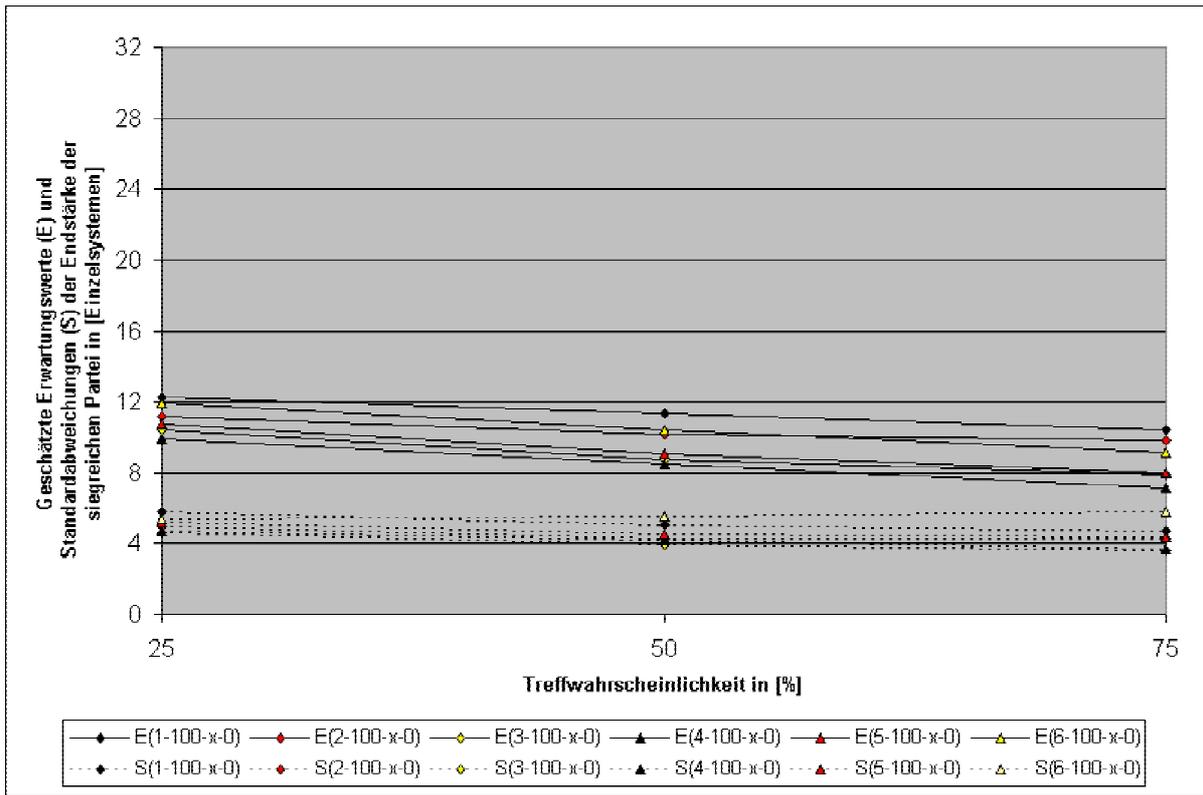


Abbildung 7.21: Geschätzte Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei bei Variation der Treffwahrscheinlichkeit (Variantengruppe x-100-y-0)

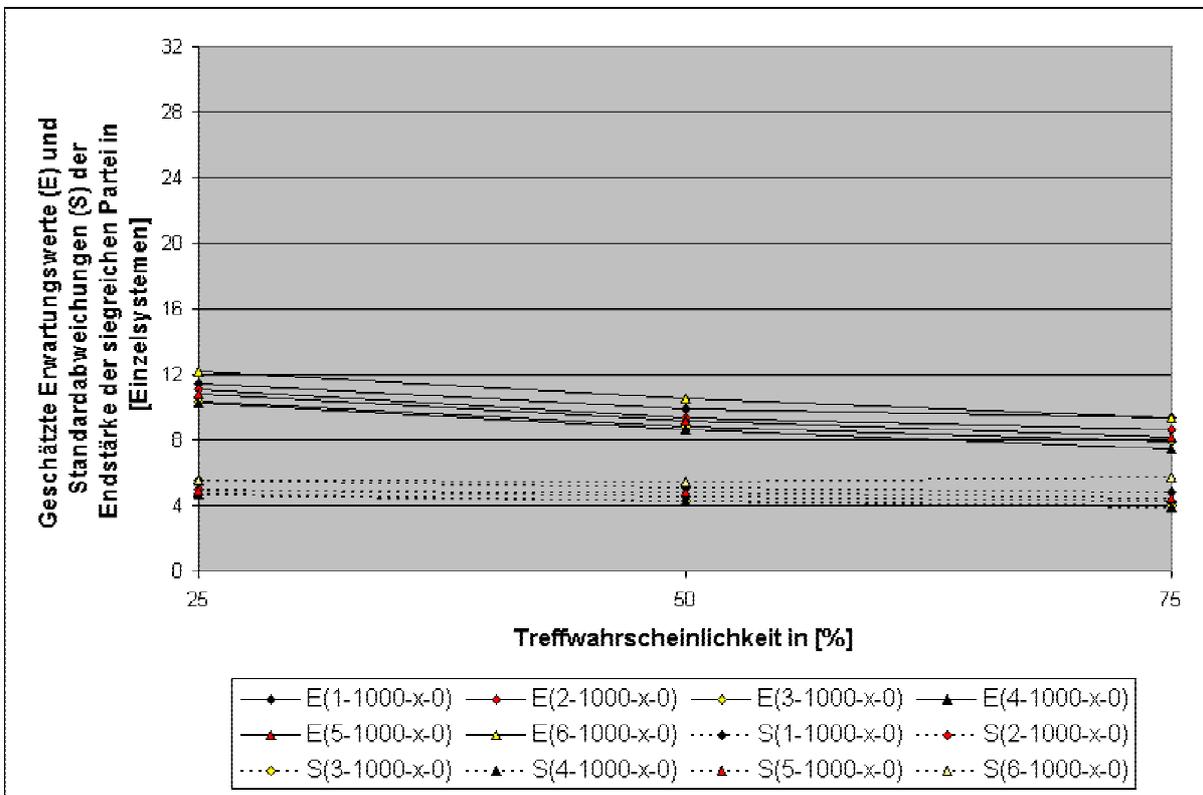


Abbildung 7.22: Geschätzte Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei bei Variation der Treffwahrscheinlichkeit (Variantengruppe x-1000-y-0)

7.2.6.3 Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe und des Feuerkoordinierungsgrades

Eine Analyse der erhaltenen Daten am Beispiel der Variantengruppen x-100-25-y (vgl. Abbildung 7.23) und x-1000-75-y (vgl. Abbildung 7.24) zeigt einerseits, dass eine Variation des *Feuerkoordinierungsgrades* zu keiner signifikanten Veränderung des geschätzten Erwartungswertes bzw. der Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei führt. Andererseits lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* offensichtlich zu Schwankungen in dem geschätzten Erwartungswert führt. Diese Schwankungen sind zwar bei allen Variantengruppen zu beobachten, fallen aber stets deutlich geringer als die auf der nicht aggregierten Ebene geschätzte Standardabweichung aus, so dass sie für die Konsistenzbewertung als vernachlässigbar im Sinne der Definition bewertet werden können.

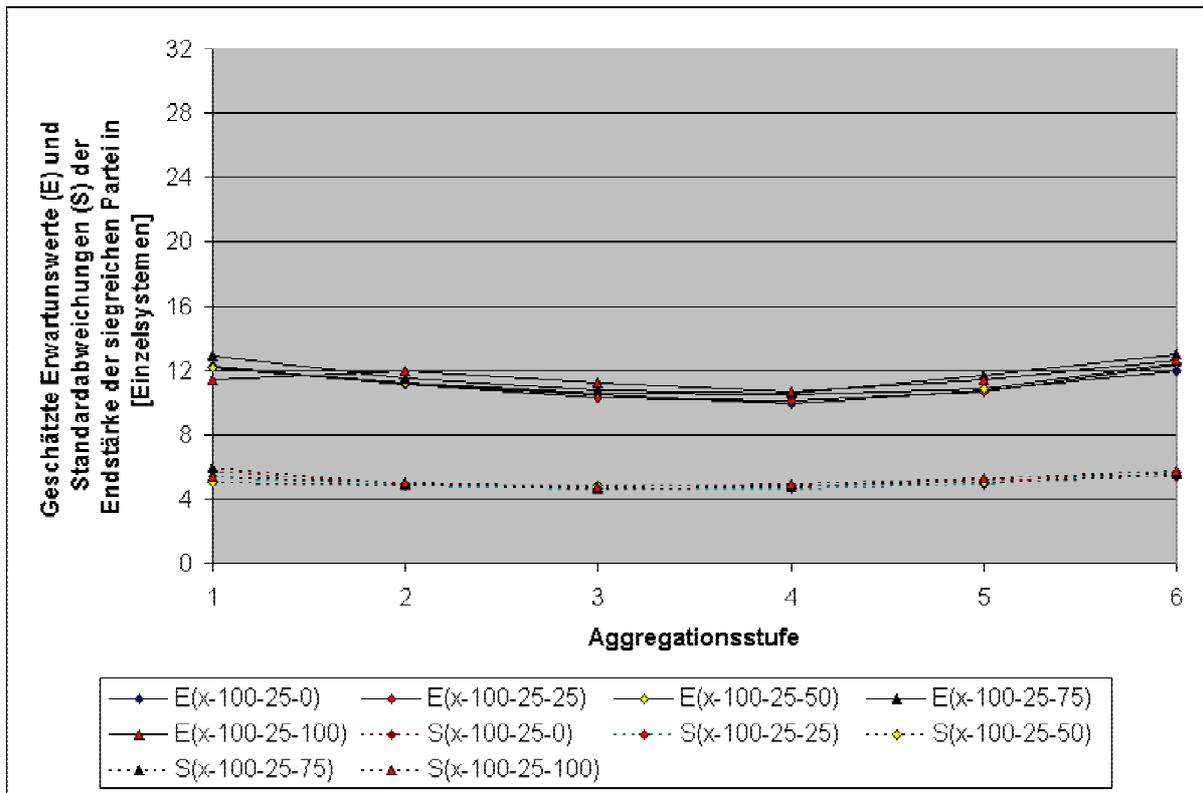


Abbildung 7.23: Verlauf der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe (Variantengruppe x-100-25-y)

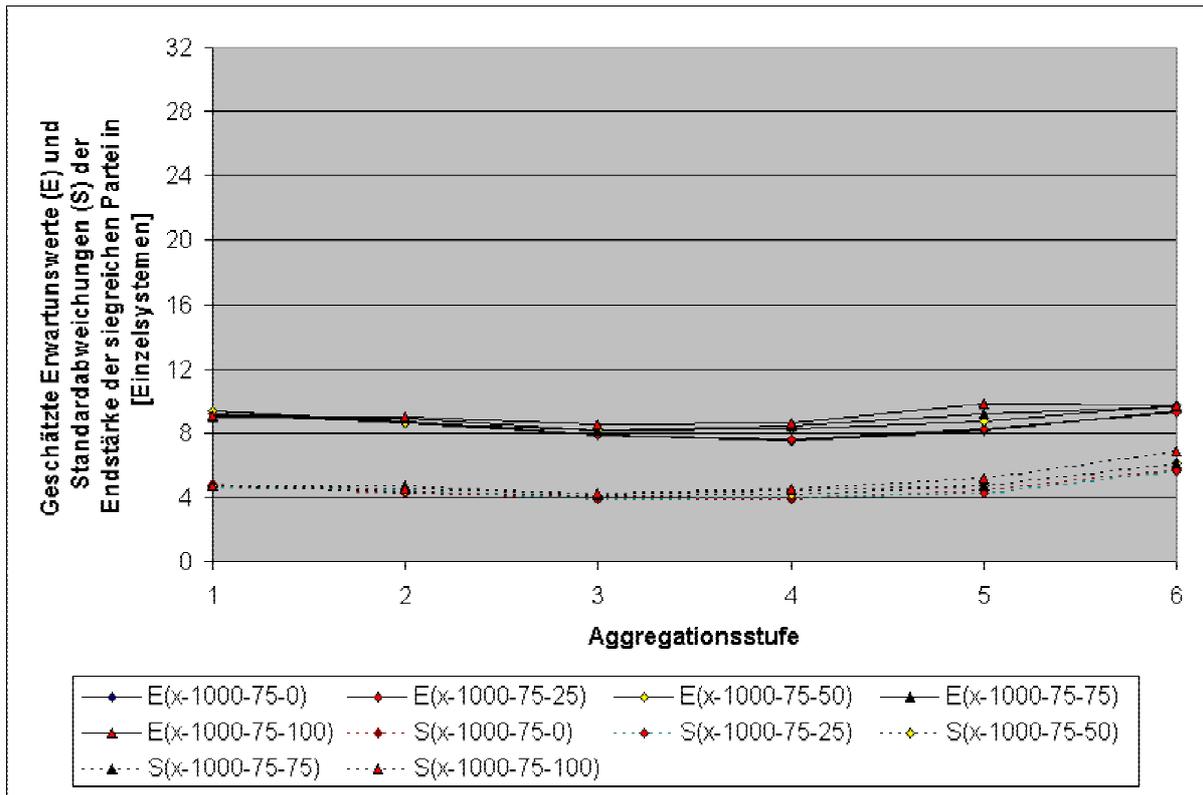


Abbildung 7.24: Verlauf der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe (Variantengruppe x-1000-75-y)

7.2.6.4 Zusammenfassung

Es lässt sich somit zusammenfassend feststellen, dass bezüglich der Bewertungsgröße der Endstärke der siegreichen Partei keine im Sinne der verwendeten Definition signifikanten Veränderungen durch Variation der gewählten Kenngrößen Gefechtsdistanz, Treffwahrscheinlichkeit und Feuerkoordinierungsgrad zu beobachten sind.

Die aufgrund der aggregierten Simulationsläufe geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei unterliegen gegenüber dem nicht aggregierten Fall zwar offensichtlich Schwankungen, diese können aber als vernachlässigbar bewertet werden.

Generell kann somit ausgesagt werden, dass bezüglich der Endstärke der siegreichen Partei bei aggregierter Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips gegenüber der nicht aggregierten Abbildung starke Konsistenz vorliegt.

7.2.7 Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs

7.2.7.1 Grundsätzliche Aussagen

Neben den zuvor betrachteten Bewertungsgrößen kommt dem Verlauf der geschätzten Erwartungswerte und zugehörigen Standardabweichungen der **Gesamtstärken** der Parteien über der Simulationszeit²⁶³ eine zentrale Rolle zu. Im Gegensatz zu den geschätzten Werten für die Gewinnhäufigkeit, Gefechtsdauer sowie die Endstärke der siegreichen Partei, welche nur singulären Charakter besitzen, d.h. keinen direkten Aufschluss darüber erlauben, wie sie im Verlauf des simulierten Gefechtes zustande gekommen sind, ermöglicht es ihre Analyse eine grundlegende Vorstellung des eigentlichen Gefechtsverlaufes zu erhalten, indem Phasen mit starker bzw. schwacher Abnutzungstätigkeit identifiziert werden können.

Betrachtet man die für die jeweiligen Varianten ermittelten Verläufe, so lassen sich folgende grundlegende Aussagen treffen:

- Eine Verringerung der *Gefechtsdistanz* führt im aggregierten sowie im nicht aggregierten Fall bei großen Treffwahrscheinlichkeiten zu einem anfänglich steileren Verlauf der geschätzten Erwartungswerte. Mit steigender Aggregationsstufe verringert sich dieser Effekt (vgl. Kapitel 7.2.7.2).
- Eine Erhöhung der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* führt im aggregierten und nicht aggregierten Fall zu einem ebenfalls steileren Verlauf der geschätzten Erwartungswerte (vgl. Kapitel 7.2.7.3).
- Im aggregierten Fall führt eine Erhöhung des *Feuerkoordinierungsgrades* bei hohen Treffwahrscheinlichkeiten zu einem anfänglich steileren Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte (vgl. Kapitel 7.2.7.4).
- Eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* führt nicht zu signifikanten Veränderungen im Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte und Kräftestandardabweichungen (vgl. Kapitel 7.2.7.5).

7.2.7.2 Analyse der Auswirkungen der Gefechtsdistanz

Eine Analyse der ermittelten Werte lässt erkennen, dass eine Verringerung der *Gefechtsdistanz* bei hohen Treffwahrscheinlichkeiten von 50% bzw. 75% grundsätzlich einen steileren Abbau der geschätzten Kräfteerwartungswerte zur Folge hat. Ein gleichzeitiger Anstieg der Aggregationsstufe verringert diesen Effekt, so dass er auf Aggregationsstufe 6 schließlich nicht mehr festzustellen ist. Die ebenfalls geschätzten Kräftestandardabweichungen weisen bei Verringerung der Gefechtsdistanz und hoher Treffwahrscheinlichkeit zwar eine tendenzielle Erhöhung auf (vgl. Abbildung 7.29 und Abbildung 7.30), diese muss jedoch aufgrund ihrer sehr geringen Größenordnung als nicht signifikant beurteilt werden.

Betrachtet man die bereits erfolgte Diskussion der Auswirkung einer Veränderung der Gefechtsdistanz auf den geschätzten Erwartungswert der Gefechtsdauer,²⁶⁴ so scheint diese auch geeignet, den nun geschilderten Effekt zu erklären.

²⁶³ Im Folgenden kurz als Kräfteerwartungswert bzw. Kräftestandardabweichung bezeichnet.

²⁶⁴ vgl. Kapitel 7.2.5.3 S. 175f

Wie bereits ausgeführt, führt eine Verringerung der Gefechtsdistanz von 1.000m auf 500m bzw. 100m zu einer Erhöhung der modifizierten Entdeckungswahrscheinlichkeit von 20% auf ca. 57% bzw. 100%. Dies hat notwendigerweise zur Folge, dass bereits im Rahmen der ersten Aufklärungsvorgänge im Mittel eine deutlich höhere Anzahl an feindlichen Einzelsystemen durch die eigenen Einzelsysteme (nicht aggregierter Fall) bzw. aggregierte Gefechtselemente (aggregierter Fall) entdeckt werden. In Kombination mit einer höheren entfernungsunabhängigen Treffwahrscheinlichkeit von 50% bzw. 75% resultiert dies schlussendlich in einer größeren Anzahl an bereits zu Beginn des Gefechts vernichteten feindlichen Einzelsystemen und somit in dem beobachteten steileren Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte (vgl. Abbildung 7.25 und Abbildung 7.26). Bei einer geringen Treffwahrscheinlichkeit von nur 25% führt die Verringerung der Gefechtsdistanz zwar ebenfalls zu einer bereits zu Gefechtsbeginn erhöhten Anzahl entdeckter feindlicher Einzelsysteme, dies wirkt sich aufgrund der größeren Anzahl an Fehlschüssen jedoch nicht in einer signifikant höheren Abnutzungsrate (vgl. Abbildung 7.27) aus.

Die Abnahme dieses Effekts bei Erhöhung der Aggregationsstufe findet ihre Erklärung wiederum in einer Betrachtung der Bedeutung der Entdeckungswahrscheinlichkeit im aggregierten Fall sowie dem in SAMBA verwendeten Ansatz der einseitig individuellen Entdeckung. Diese beiden Tatsachen führen in der bereits beschriebene Weise dazu, dass die Bedeutung der Gefechtsdistanz für die Entdeckungswahrscheinlichkeit mit steigender Aggregationsstufe zugunsten der Bedeutung der Mächtigkeit abnimmt, so dass der im Fall kleiner Aggregationsstufen zu beobachtende Effekt abnimmt und auf Aggregationsstufe 6 – auch bei Vorliegen hoher Treffwahrscheinlichkeiten – praktisch nicht mehr feststellbar ist (vgl. Abbildung 7.28).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beschriebene Auswirkung der Variation der Gefechtsdistanz auf den Abbau der Kräfteerwartungswerte, welche im nicht aggregierten Fall festzustellen ist, im aggregierten Fall – zumindest bis einschließlich Aggregationsstufe 4 – gut abgebildet wird. Die Abweichungen, welche auf höheren Aggregationsstufen gegenüber der Einzelsystemabbildung durch die Verminderung dieses Effektes auftreten, bewegen sich stets in einer Größenordnung, welche mit Blick auf ihrer Bedeutung für das simulierte Gefecht sowie die geschätzte Standardabweichung der Aggregationsstufe 1 im Rahmen der Konsistenzbetrachtung als nicht signifikant zu bewerten sind.

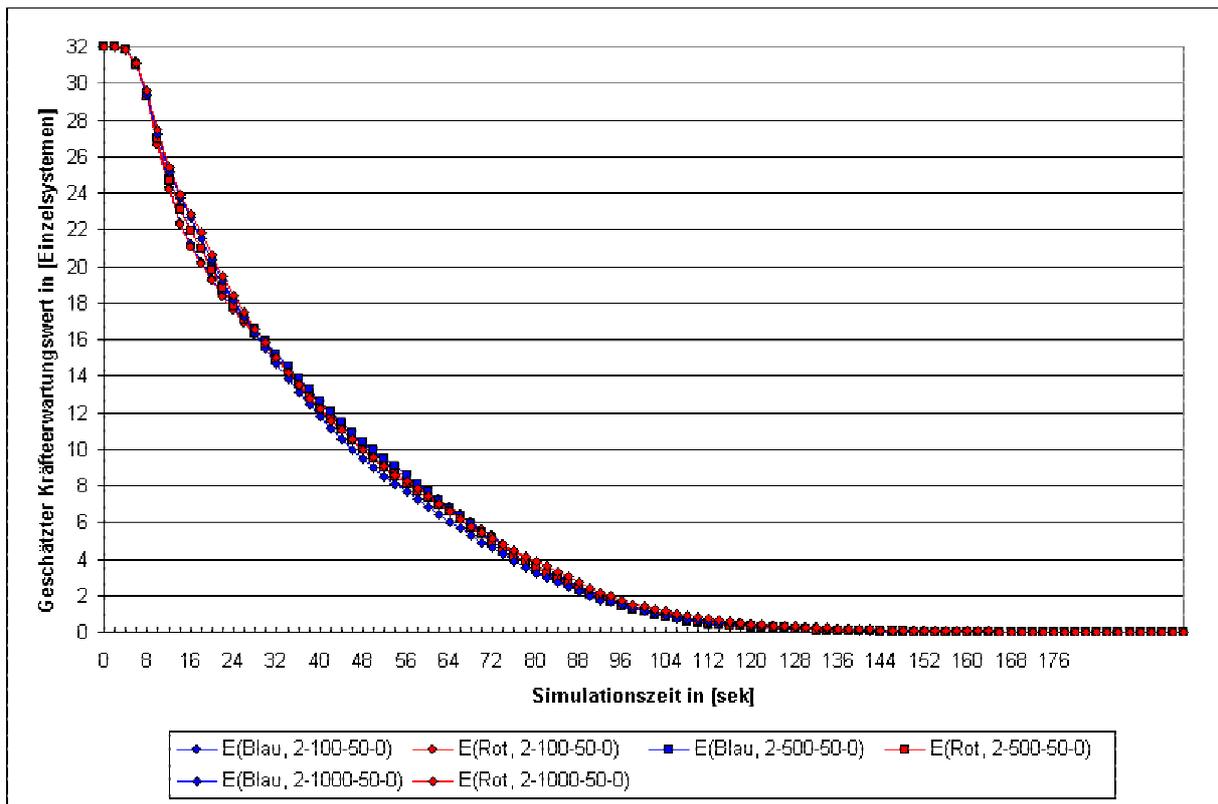


Abbildung 7.25: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 2-x-50-0)

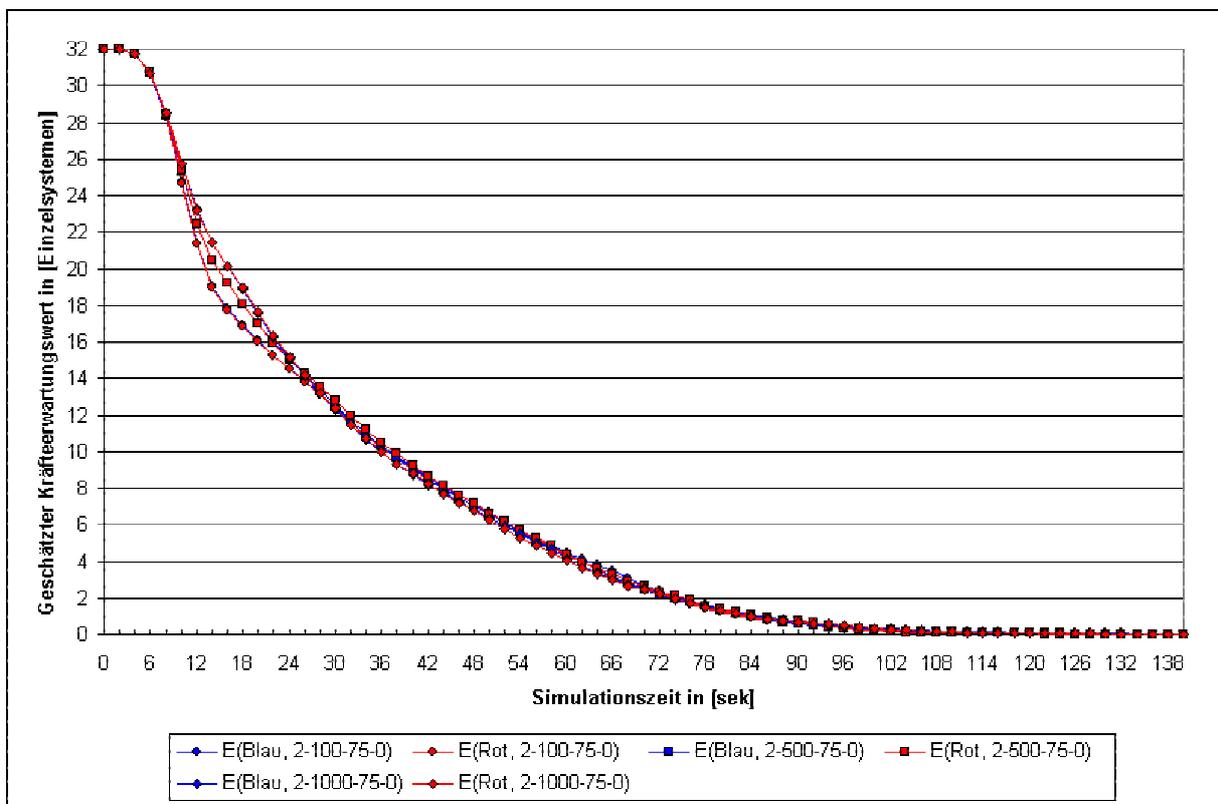


Abbildung 7.26: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 2-x-75-0)

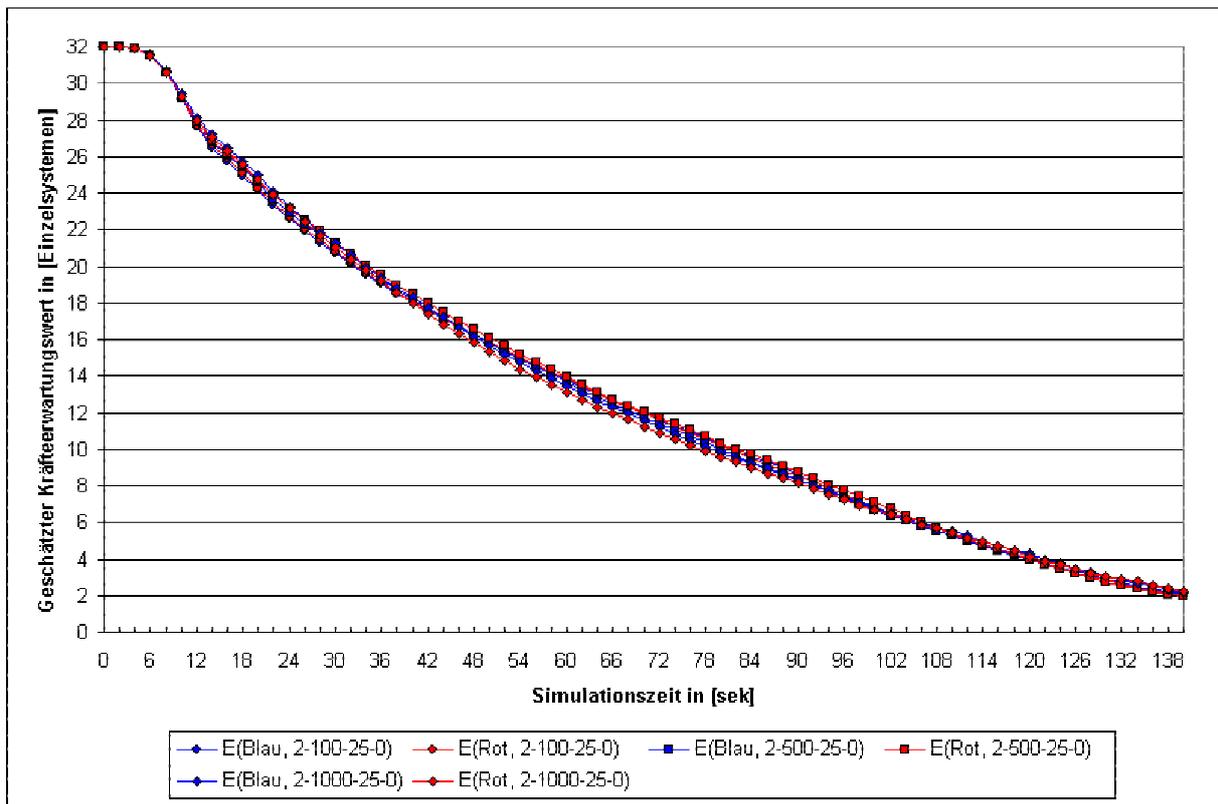


Abbildung 7.27: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 2-x-25-0)

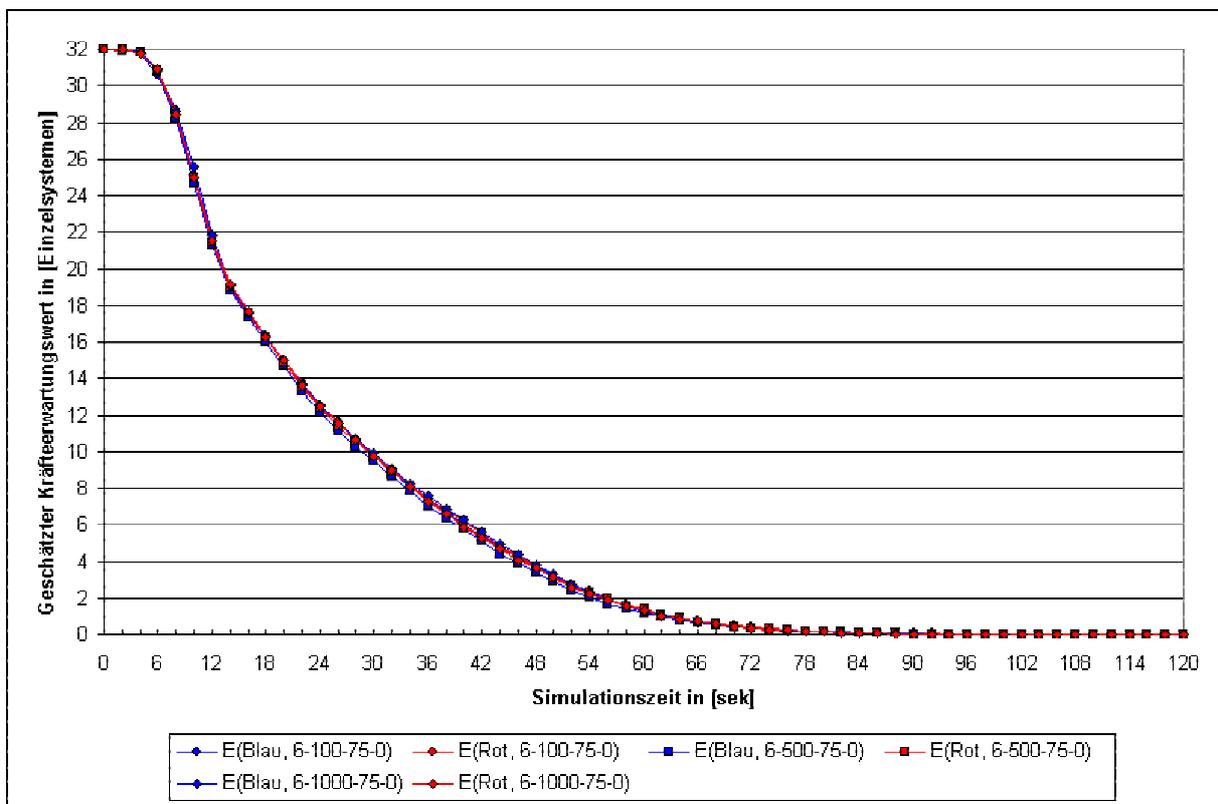


Abbildung 7.28: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 6-x-75-0)

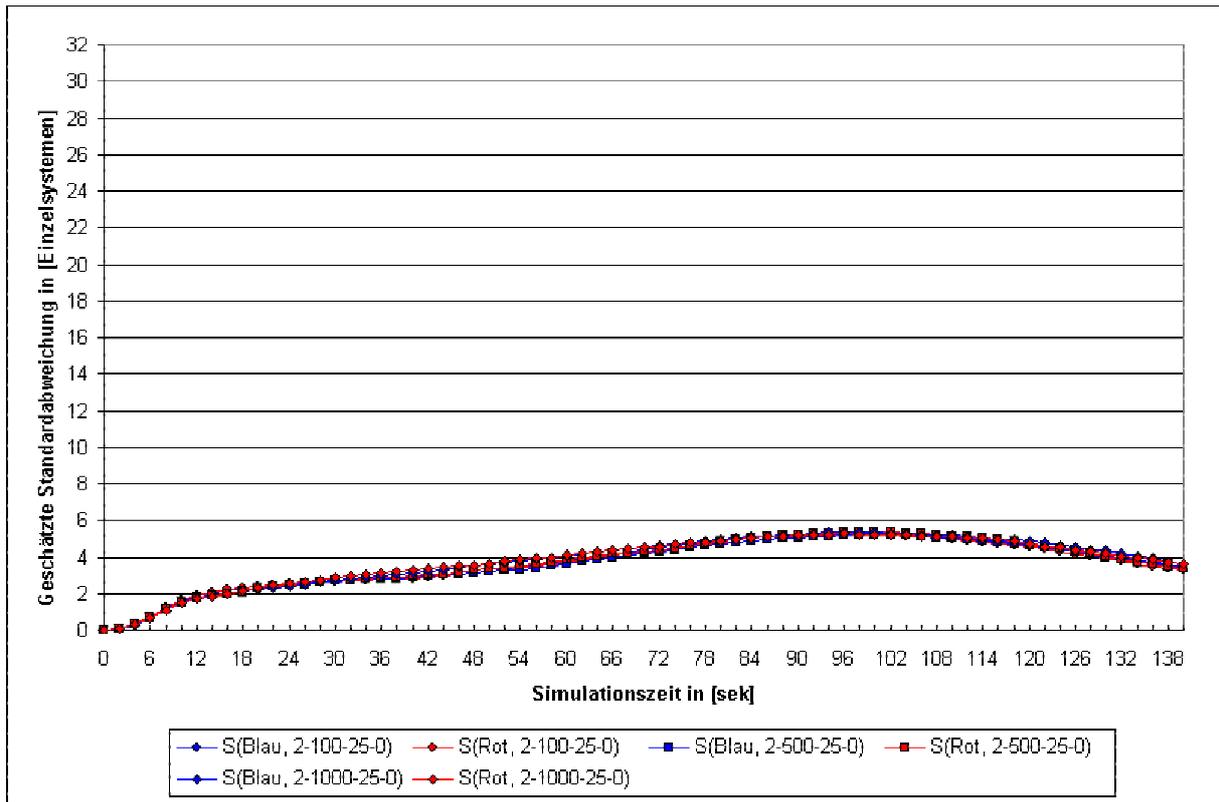


Abbildung 7.29: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 2-x-25-0)

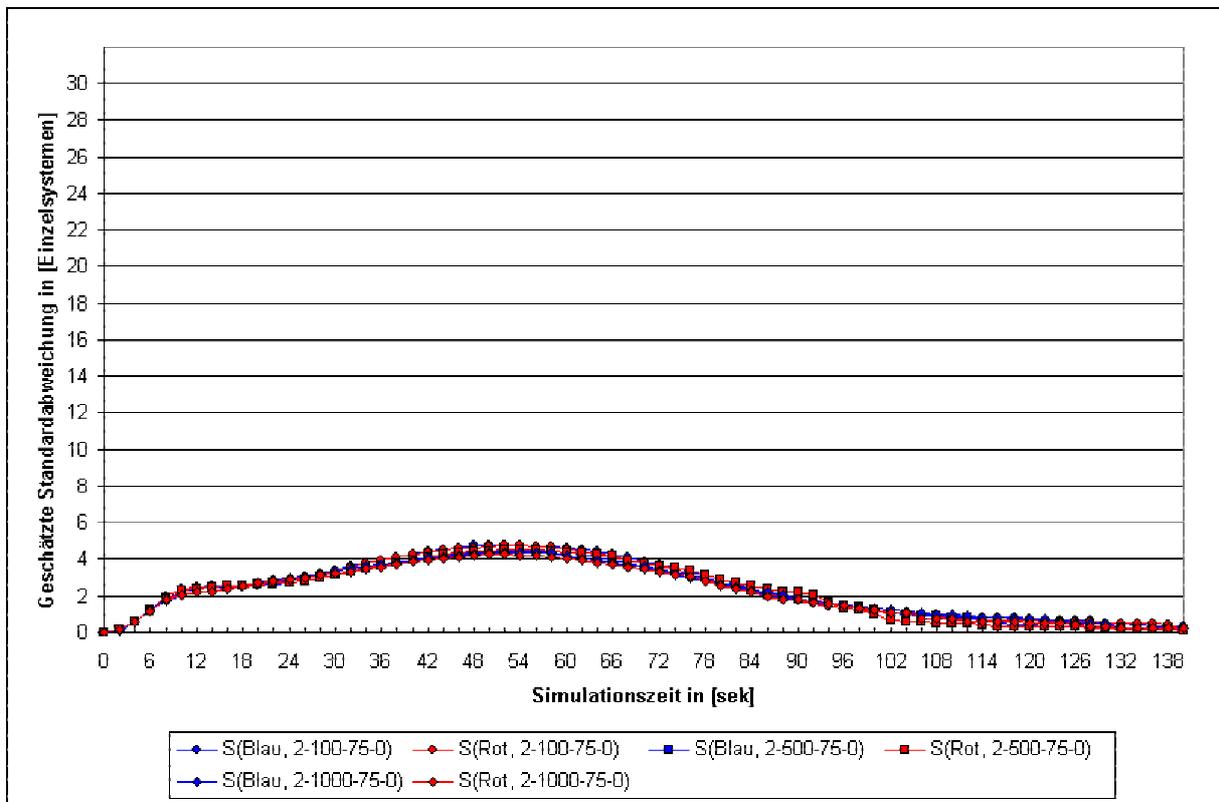


Abbildung 7.30: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 2-x-75-0)

7.2.7.3 Analyse der Auswirkungen der Treffwahrscheinlichkeit

Eine Erhöhung der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* führt im aggregierten sowie im nicht aggregierten Fall bei allen betrachteten Gefechtsdistanzen zu einem gerade anfänglich deutlich steileren Abbau der geschätzten Erwartungswerte (vgl. Abbildung 7.31 und Abbildung 7.32). Das generelle Auftreten dieses Effektes ist leicht nachvollziehbar, da eine erhöhte Treffwahrscheinlichkeit grundsätzlich zu einer im Mittel geringeren Anzahl an Fehlschüssen und somit zu einer größeren Zahl an Treffern führt, welche ihrerseits wiederum in einer erhöhten Anzahl an Ausfällen und somit dem beobachteten steileren Abbau der Kräfteerwartungswerte resultieren. Bei den geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien ist folgerichtig bei hohen Treffwahrscheinlichkeiten zu Beginn ein tendenzieller Anstieg gegenüber dem Niveau geringer Treffwahrscheinlichkeiten zu beobachten (vgl. Abbildung 7.33 und Abbildung 7.34). Dieser erklärt sich aus der größeren Zahl zufallsbehafteter Wirksamkeitsermittlungen, welche aufgrund der gestiegenen Trefferzahl notwendig werden.²⁶⁵ Gegen Ende des betrachteten Simulationszeitraumes ist weiterhin ein merkliches Nachlassen der Kräftestandardabweichungen zu beobachten, da hier bei hohen Treffwahrscheinlichkeiten bereits deutlich mehr Einzelsysteme ausgefallen sind und somit im Mittel nur noch eine geringere Anzahl an Abnutzungsprozessen simuliert wird.

Für die Beurteilung der Güte der aggregierten Abbildung gegenüber der Einzelsystemabbildung ist somit vor allem ausschlaggebend, dass der beobachtete Effekt auf den Aggregationsstufen 2-6 nicht nur generell sondern vor allem auch in einer gegenüber Aggregationsstufe 1 vergleichbaren Größenordnung auftritt. Zu diesem Zweck bietet es sich an, den Verlauf über der Simulationszeit der absoluten Differenzen, welche sich zwischen den geschätzten Kräfteerwartungswerten durch Erhöhung der Treffwahrscheinlichkeit von 25% auf 50% ergeben, für die betrachteten Aggregationsstufen zu ermitteln und anschließend miteinander zu vergleichen (vgl. Abbildung 7.35 und Abbildung 7.36).

Es lässt sich dabei feststellen, dass einzig die Werte der Aggregationsstufe 6 sich merklich von den Werten der restlichen Aggregationsstufen unterscheiden, so dass im Sinne der verwendeten Definition von [Davis, Bigelow 98] für die Aggregationsstufen 1-5 bezüglich der Auswirkung einer Variation der Treffwahrscheinlichkeit von starker Konsistenz gesprochen werden kann.

Eine detaillierte Betrachtung der Werte der Aggregationsstufe 6 ergibt abschließend, dass die dort festgestellten Abweichung gegenüber den Werten der restlichen Aggregationsstufen 1-5 zwar größer sind, in ihrer Größenordnung jedoch weiterhin deutlich unterhalb der entsprechenden geschätzten Kräftestandardabweichung der Aggregationsstufe 1 liegen. Es kann damit auch für die Aggregationsstufe 6 bezüglich der Auswirkung einer Variation der Treffwahrscheinlichkeit von starker Konsistenz gesprochen werden.

²⁶⁵ vgl Kapitel 6.1.4.6, S. 146f

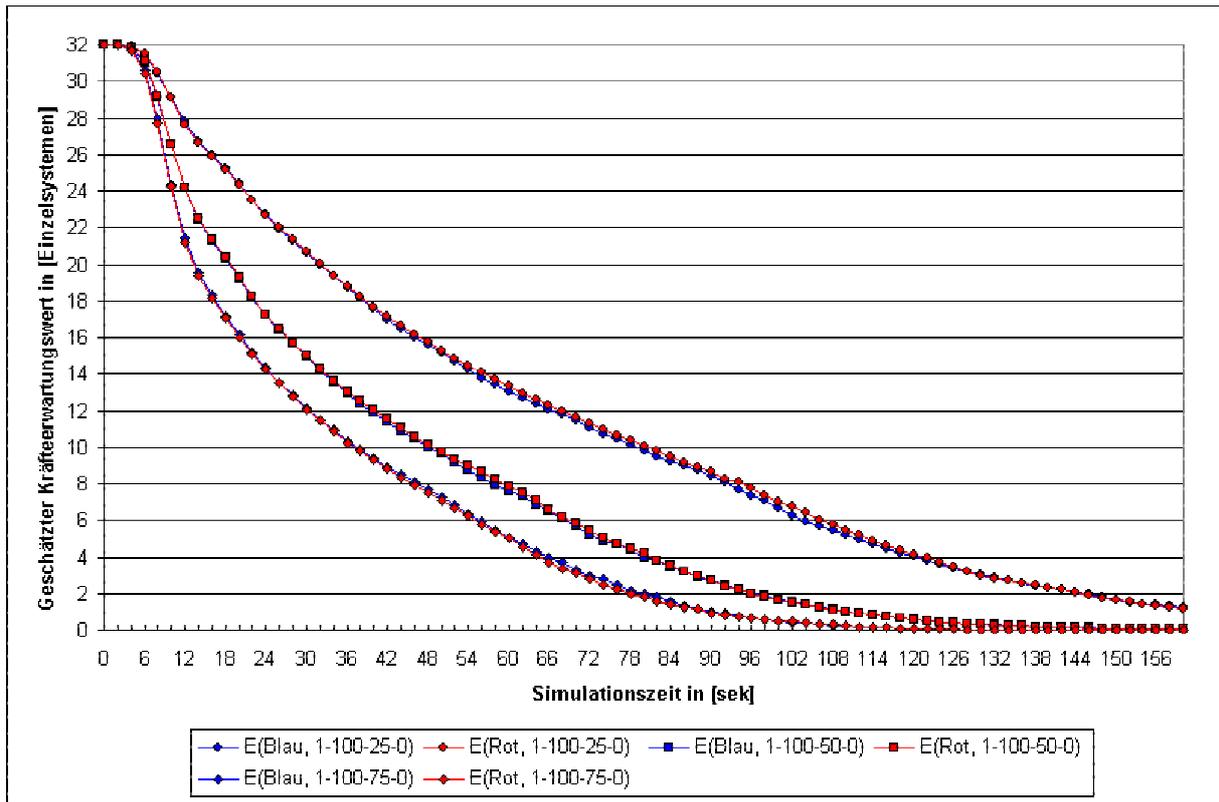


Abbildung 7.31: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 1-100-x-0)

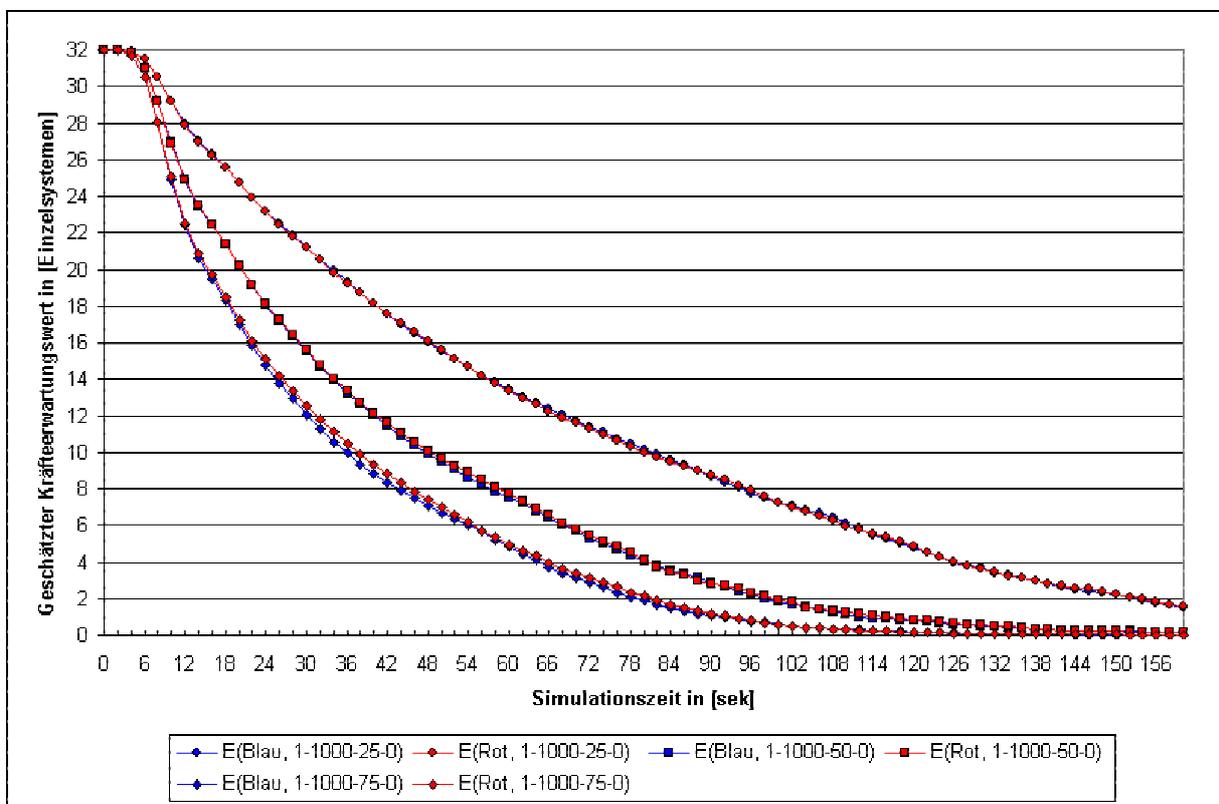


Abbildung 7.32: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 1-1000-x-0)

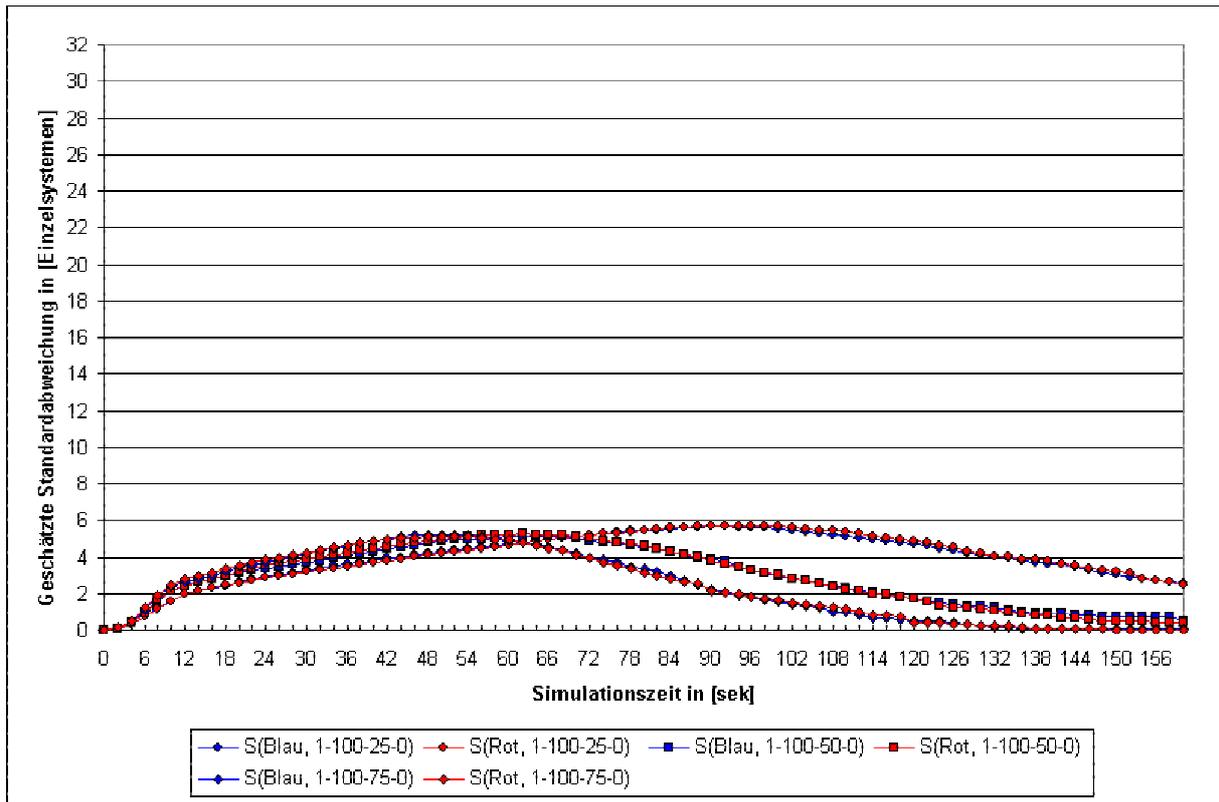


Abbildung 7.33: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 1-100-x-0)

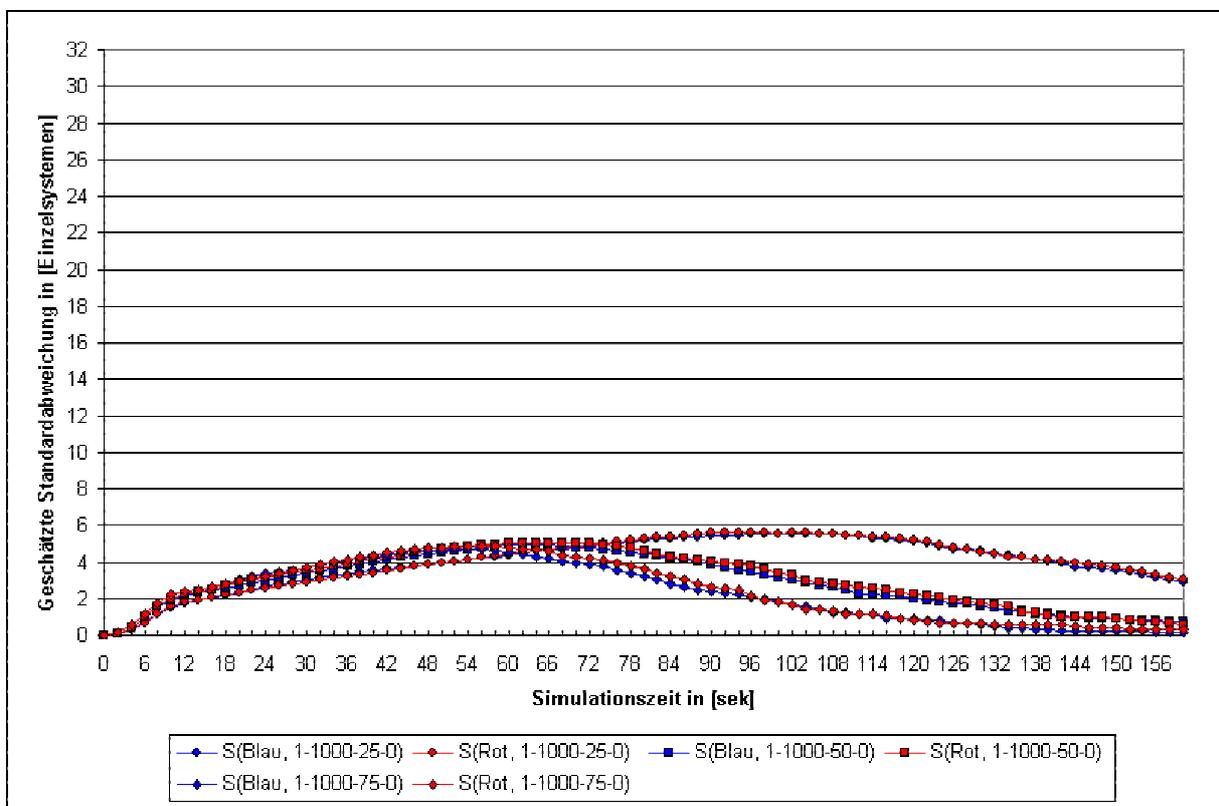


Abbildung 7.34: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 1-1000-x-0)

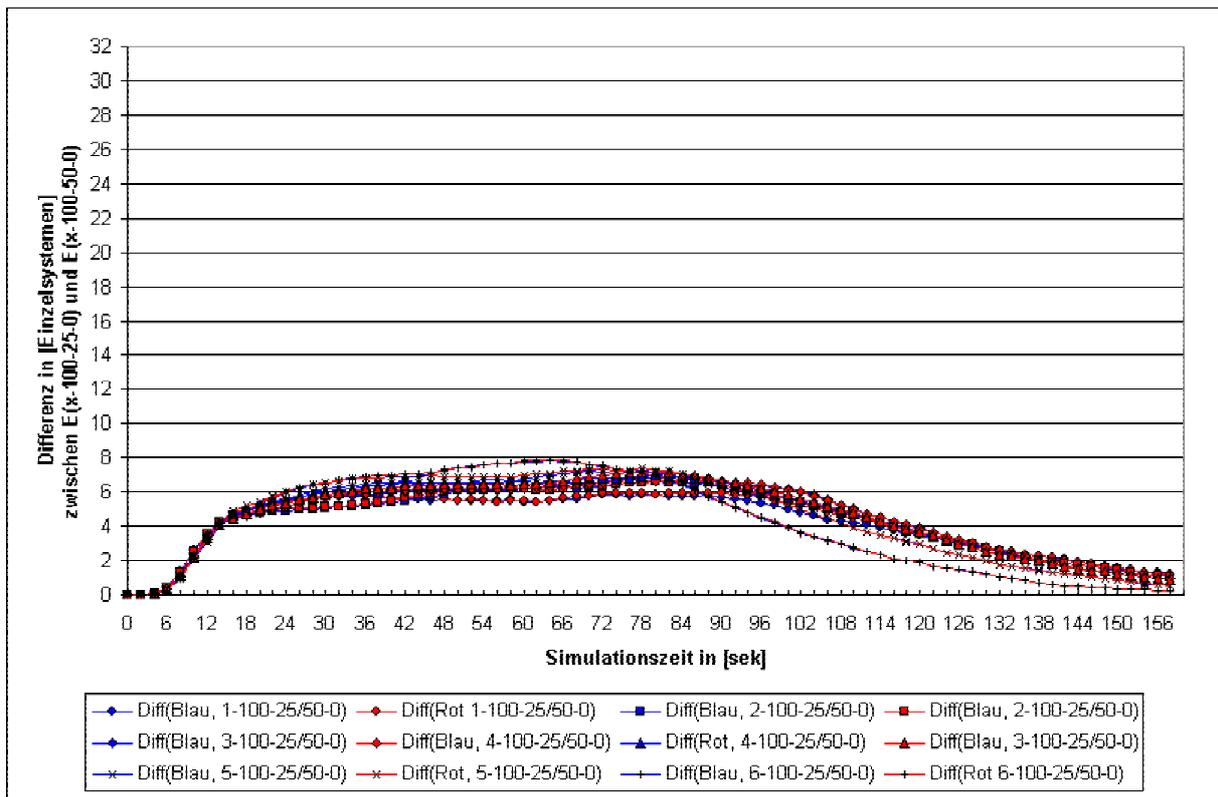


Abbildung 7.35: Absolute Differenz zwischen den Kräfteerwartungswerten der Varianzengruppen x-100-25-0 und x-100-50-0

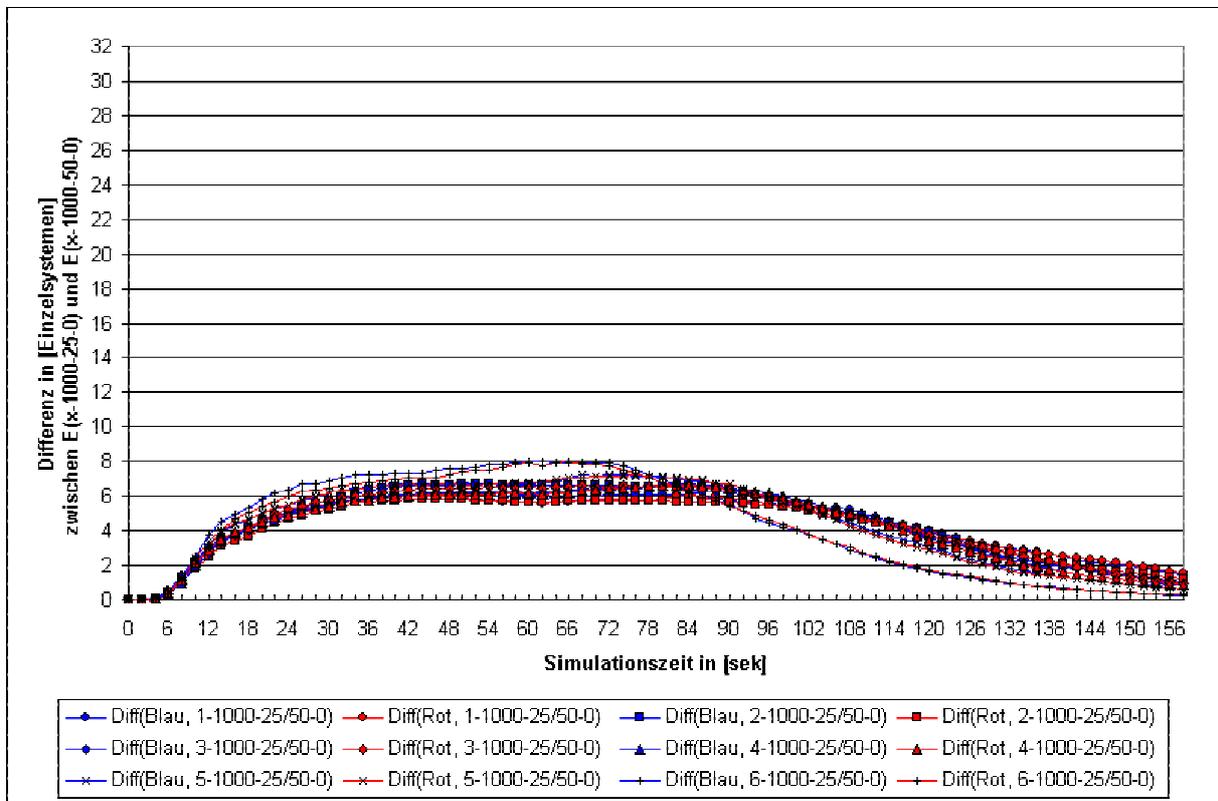


Abbildung 7.36: Absolute Differenz zwischen den Kräfteerwartungswerten der Varianzengruppen x-1000-25-0 und x-1000-50-0

7.2.7.4 Analyse der Auswirkungen des Feuerkoordinierungsgrades

Eine Betrachtung der Daten zeigt, dass im aggregierten Fall eine Erhöhung des *Feuerkoordinierungsgrades* in Abhängigkeit von der jeweils gewählten Treffwahrscheinlichkeit zu Beginn eines Gefechts zu einem steileren Abbau der geschätzten Kräfteerwartungswerte führen kann. Dies ist besonders bei höheren Treffwahrscheinlichkeiten von 50% bzw. 75% der Fall (vgl. Abbildung 7.37 bis Abbildung 7.38), wohingegen der Effekt bei einer Treffwahrscheinlichkeit von 25% (vgl. Abbildung 7.39) praktisch nicht zu beobachten ist. Die entsprechenden Kräftestandardabweichungen unterliegen ebenfalls dazu korrespondierenden Erhöhungen, welche jedoch aufgrund ihrer geringfügigen Größenordnung im Sinne der Definition als nicht signifikant zu bewertet sind (vgl. Abbildung 7.40).

Der steilere Abbau der Kräfteerwartungswerte stellt eine logische Konsequenz der Tatsache dar, welche mit Hilfe des Feuerkoordinierungsgrades abgebildet werden soll. Dieser dient wie beschrieben²⁶⁶ dazu, den Anteil der koordiniert feuernden Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes zu bestimmen und ist damit geeignet, bei Vorliegen eines entsprechend großen Zielspektrums²⁶⁷ die im Mittel auftretende Zahl an ungewollten Doppelbekämpfungen zu verringern. Das vorhandene Feuerpotential der Gefechtselemente wird somit effektiver auf die Menge der entdeckten feindlichen Einzelsysteme verteilt, was wiederum zu dem zu beobachtenden steileren Abbau der Kräfteerwartungswerte gerade zu Beginn eines Gefechts, d.h. bei Vorliegen einer großer Mengen erleideraktiver feindlicher Ziele, führen kann. Dieser Effekt tritt selbstverständlich nur dann deutlich zu Tage, wenn durch entsprechend hohe Treff- und Wirkwahrscheinlichkeiten gewährleistet ist, dass die abgegebenen Schüsse auch Wirkung zeigen können. Ist dies nicht der Fall, so kann eine bessere Feuerverteilung augenscheinlich nicht zu einer höheren Abnutzungsrate führen, da diese dann primär durch die geringe Treffwahrscheinlichkeit bestimmt wird.

Generell muss bei diesen Betrachtung aber festgestellt werden, dass ein Vergleich der geschätzten Kräfteerwartungswerte und –standardabweichungen der aggregierten Variantengruppen mit Feuerkoordinierungsgraden von 25% bis 100% mit denen der nicht aggregierten Ebene im Rahmen der Konsistenzprüfung keinen Sinn macht, da hierbei Szenarien mit entsprechend koordiniert feuernden Einzelsystemen (aggregierte Ebene) mit solchen Szenarien verglichen würden, in welchen die Einzelsysteme der Parteien stets unkoordiniert feuern (nicht aggregierte Ebene). Die zu beobachtenden Abweichungen können dadurch nicht eindeutig auf die Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips zurückgeführt werden sondern habe ihre Ursache zumindest teilweise in dem durch Einführung eines Feuerkoordinierungsgrades von über 0% stattfindenden Übergang von unkoordiniertem zu (teilweise) koordiniertem Feuer der Einzelsysteme einer Partei.

Für die Untersuchung des Leitschützenprinzips bleibt es aber von generellem Interesse festzuhalten, dass der in diesem Rahmen eingeführte Feuerkoordinierungsgrad sich wie gezeigt nicht signifikant auf die gewählten Bewertungsgrößen der Gewinnhäufigkeit, der Dauer des Gefechts sowie der Endstärke der siegreichen Partei auswirkt,²⁶⁸ sondern vielmehr den Verlauf des Gefechts über der Simulationszeit beeinflusst.

²⁶⁶ vgl. Kapitel 6.1.4.4, S. 142f

²⁶⁷ Unter einem „entsprechend großen Zielspektrum“ ist hier die Tatsache zu verstehen, dass ein aktiv abnutzendes aggregiertes Gefechtselement bei einem feindlichen aggregierten Gefechtselement genügend erleideraktive Einzelsysteme entdeckt hat, um durch eine geeignete Feuerverteilung seiner sämtlichen schießaktiven Einzelsysteme ungewollte Doppelbekämpfungen zu vermeiden.

²⁶⁸ vgl. Kapitel 7.2.4, S. 173, Kapitel 7.2.5.2, S. 172f sowie Kapitel 7.2.6.3 S. 185f

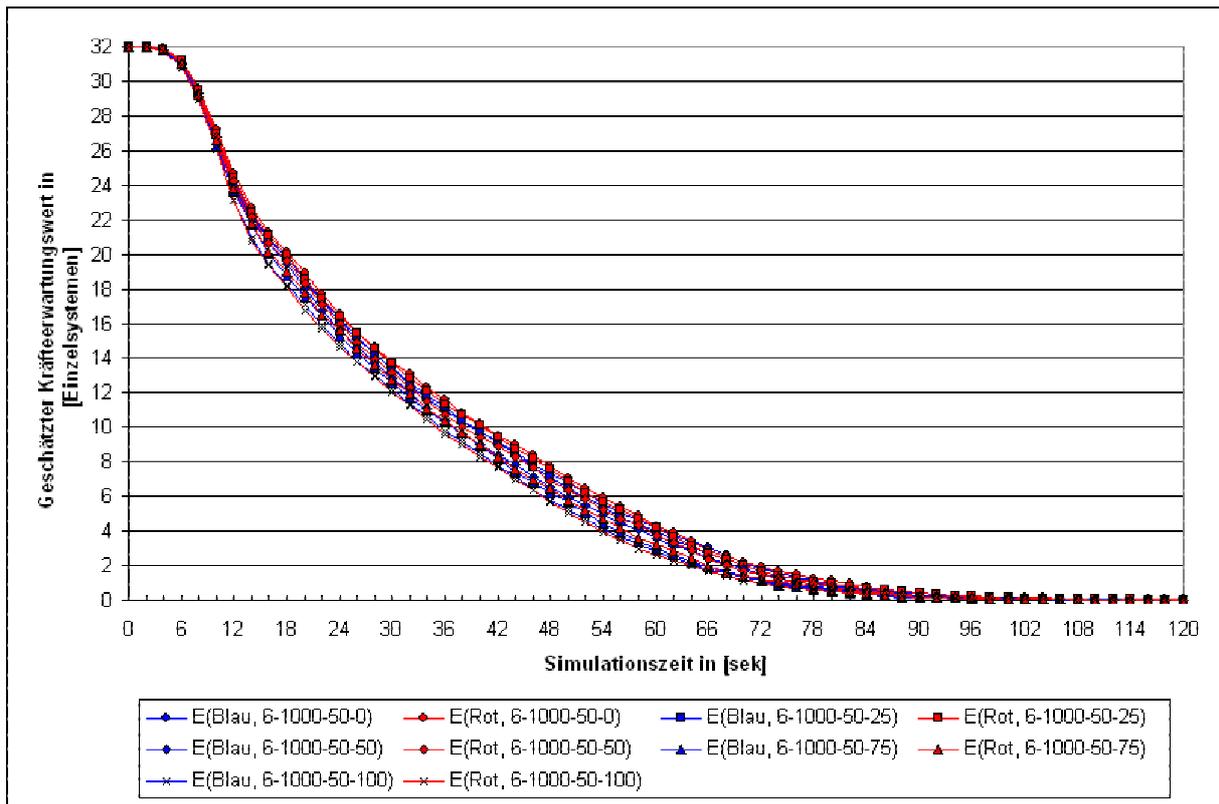


Abbildung 7.37: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 6-1000-50-x)

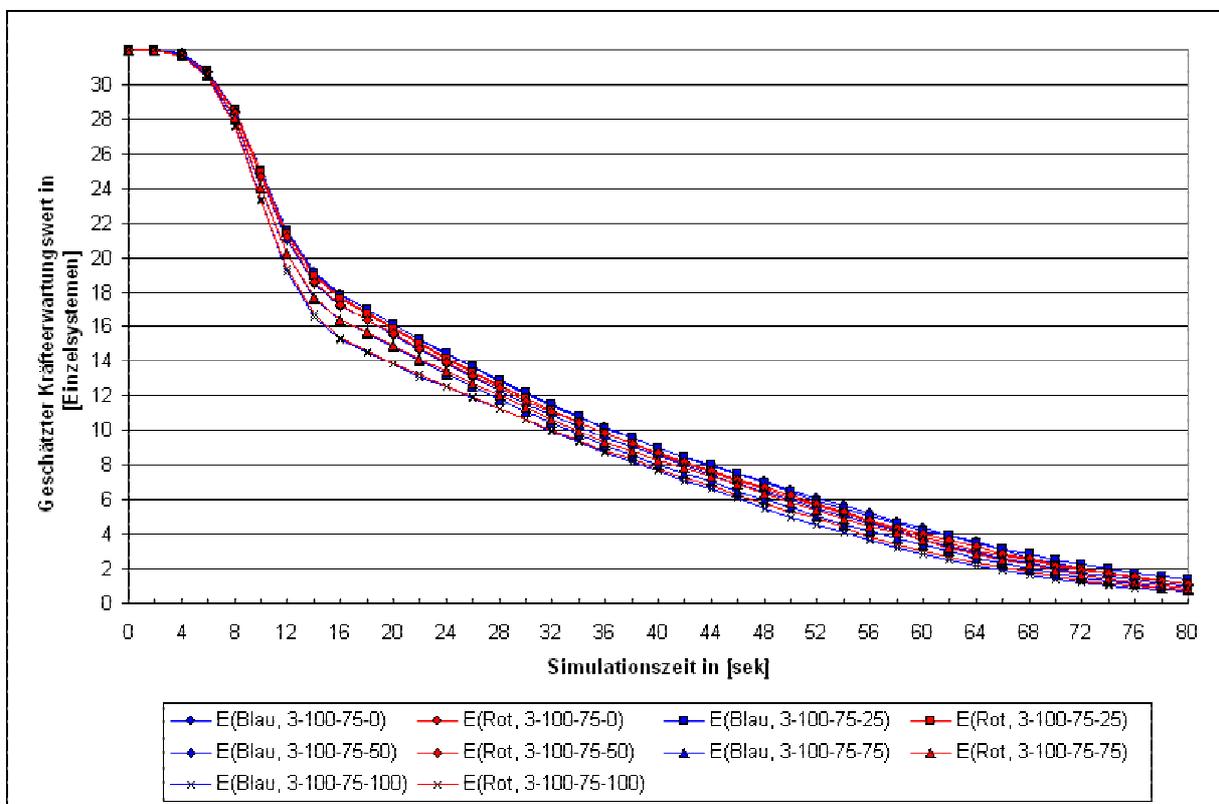


Abbildung 7.38: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 3-100-75-x)

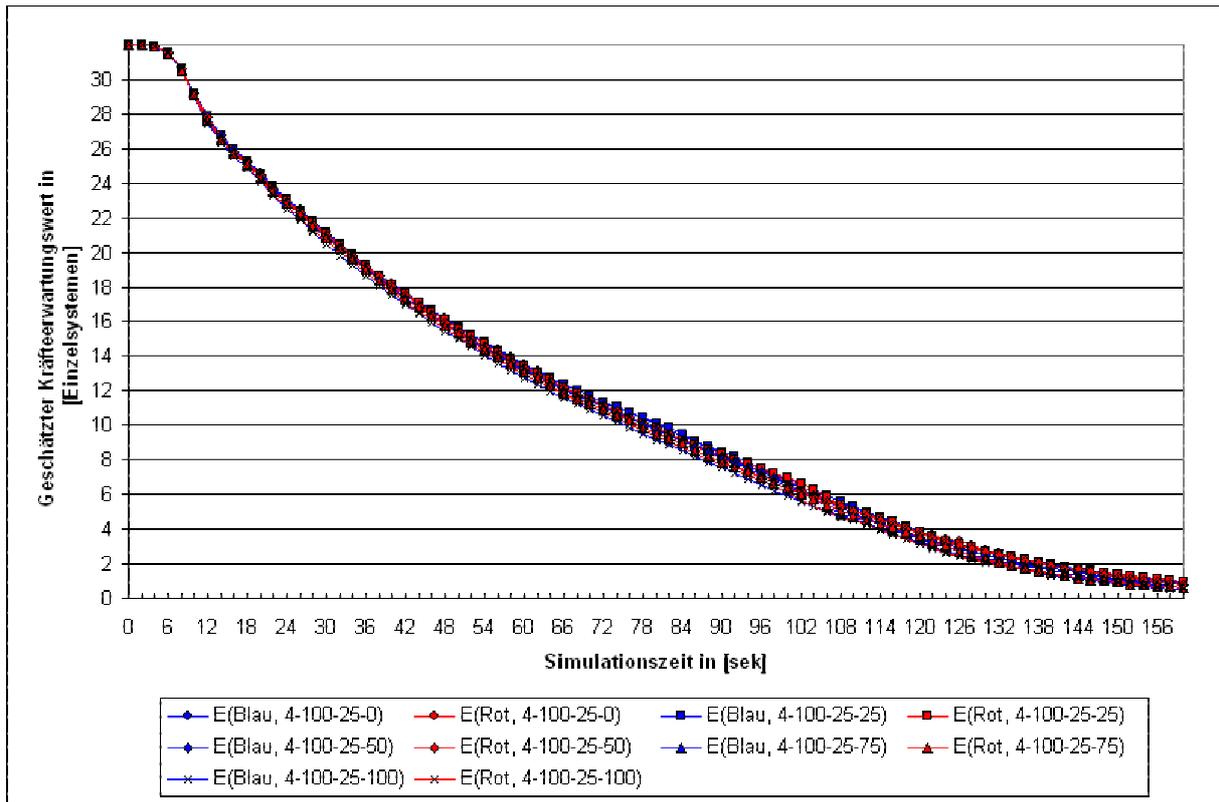


Abbildung 7.39: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 6-100-25-x)

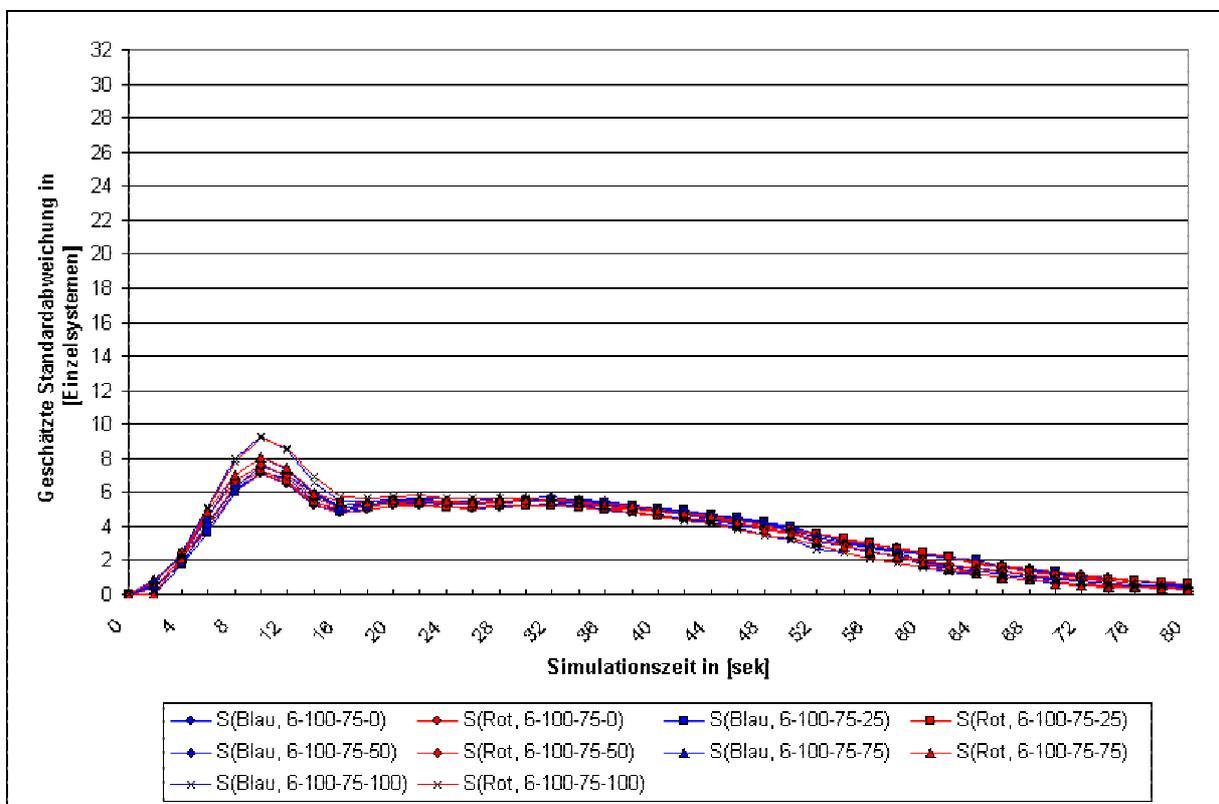


Abbildung 7.40: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe 6-100-75-x)

7.2.7.5 Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe

Eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* bei sonst gleichbleibenden Kenngrößen führt tendenziell zu einem etwas steileren Abbau der geschätzten Kräfteerwartungswerte (vgl. Abbildung 7.41 bis Abbildung 7.43) und einer entsprechenden anfänglichen Erhöhung der zugehörigen geschätzten Kräftestandardabweichungen (vgl. Abbildung 7.44 bis Abbildung 7.46). Wird die entfernungsunabhängige Treffwahrscheinlichkeit ebenfalls erhöht, so resultiert dies in einer Verstärkung des beobachteten Effekts.

Für die im Rahmen der Konsistenzbeurteilung notwendige Untersuchung dieser Abweichungen bietet es sich wiederum an, die absoluten Differenzen zwischen den geschätzten Kräftestandardabweichungen der jeweiligen Variantengruppen im nicht aggregierten Fall sowie im aggregierten Fall zu ermitteln und diese mit der geschätzten Kräftestandardabweichung der Aggregationsstufe 1 zu vergleichen. Führt man dies am Beispiel der Variantengruppe x-100-y-0 durch (vgl. Abbildung 7.47 - Abbildung 7.49), so lässt sich erkennen, dass die durch Erhöhung der Aggregationsstufe entstehenden Abweichungen stets klar unterhalb der durch die geschätzte Kräftestandardabweichung festgelegten oberen Schranke liegen. Einzig die Abweichungen der Aggregationsstufe 6 erreichen bei höheren Treffwahrscheinlichkeiten von 50% bzw. 75% überhaupt absolute Werte, welche 50% der zugehörigen Werte der Kräftestandardabweichung überschreiten und somit gegebenenfalls bei einer Verschärfung der gewählten Konsistenzkriterien zu weiteren Betrachtungen Anlass geben könnten.

Im Sinne der hier verwendeten Definition kann aber festgestellt werden, dass bei Erhöhung der Aggregationsstufe starke Konsistenz bezüglich des Verlaufs der Kräfteerwartungswerte vorliegt.

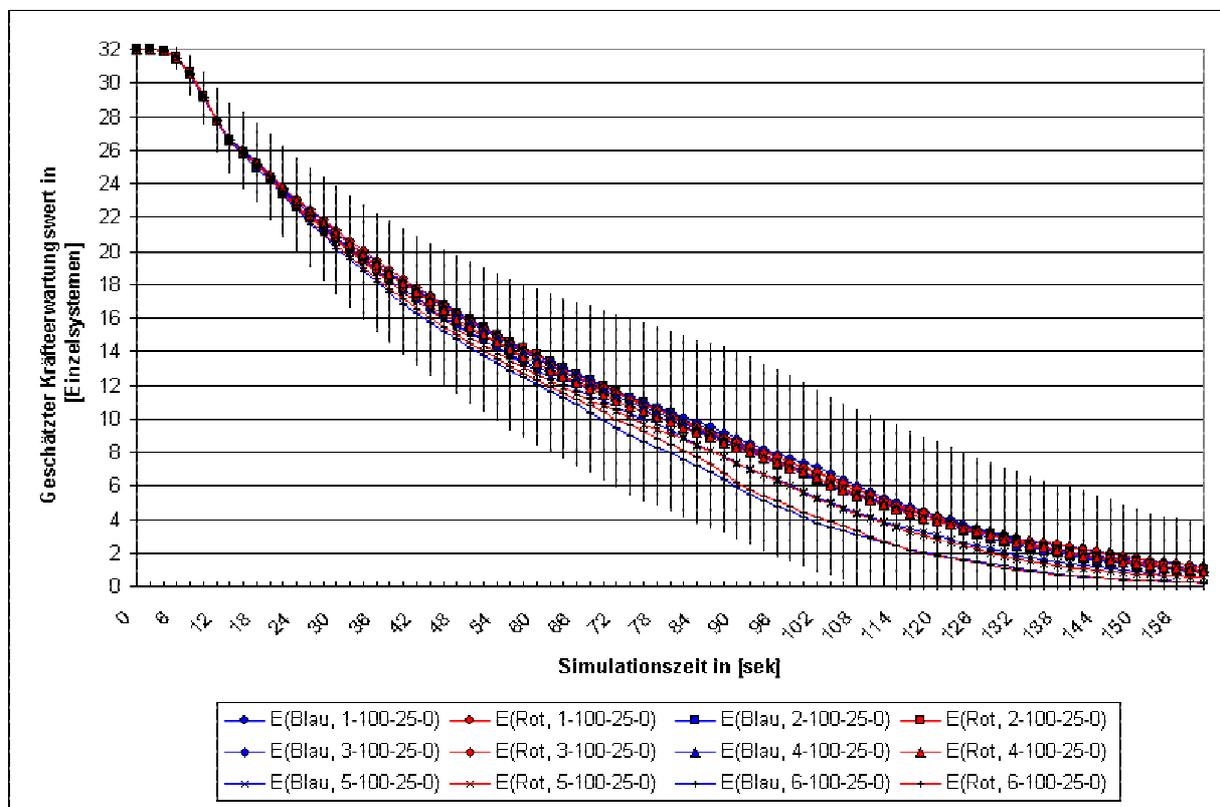


Abbildung 7.41: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-100-25-0) (Bei 1-100-25-0 ist die zugehörige geschätzte Kräftestandardabweichung als Fehlerindikator aufgetragen.)

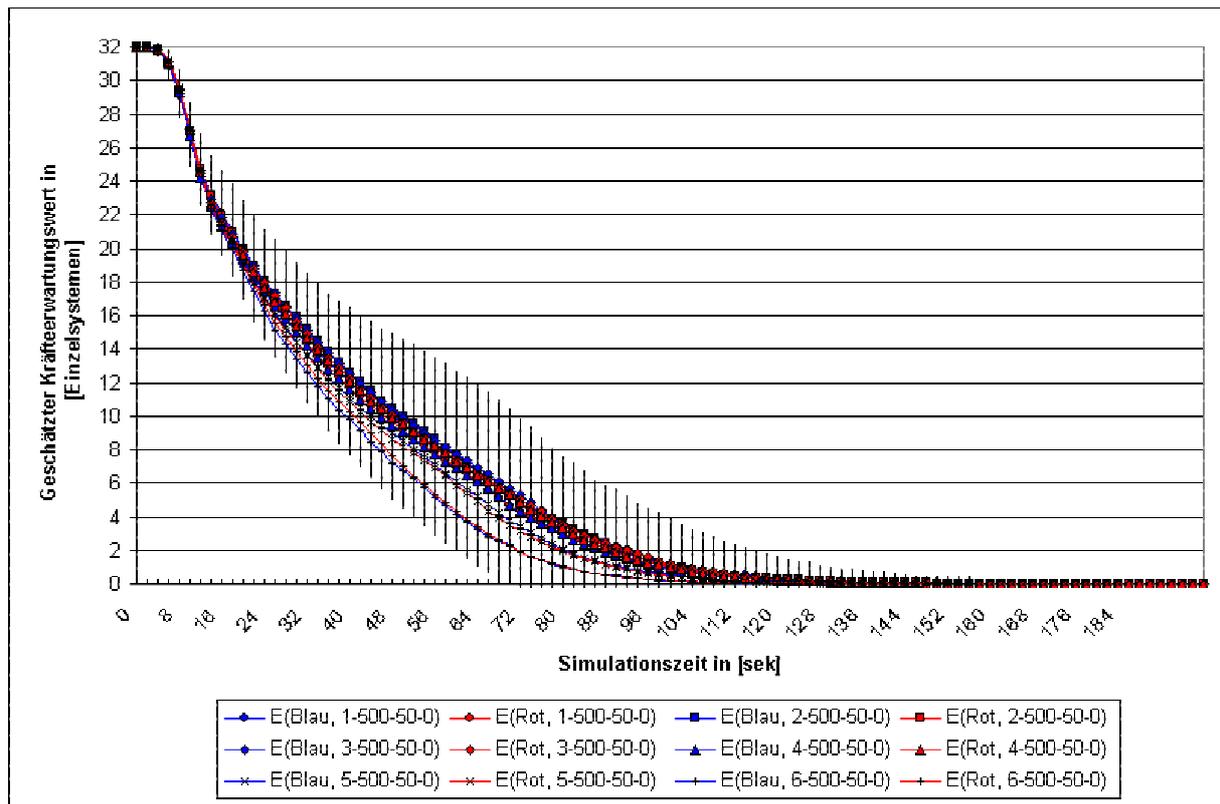


Abbildung 7.42: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-500-50-0) (Bei 1-500-50-0 ist die zugehörige geschätzte Kräftestandardabweichung als Fehlerindikator aufgetragen.)

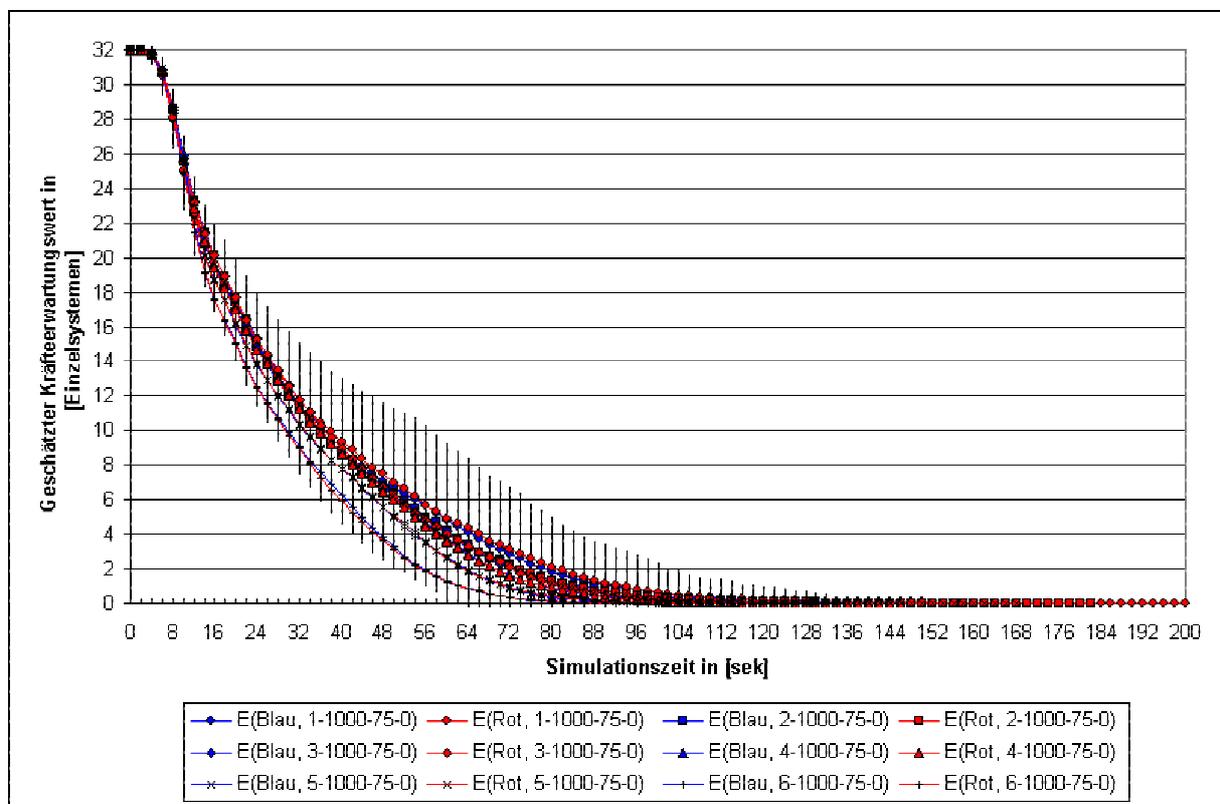


Abbildung 7.43: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-1000-75-0) (Bei 1-1000-75-0 ist die jeweils zugehörige geschätzte Kräftestandardabweichung als Fehlerindikator aufgetragen.)

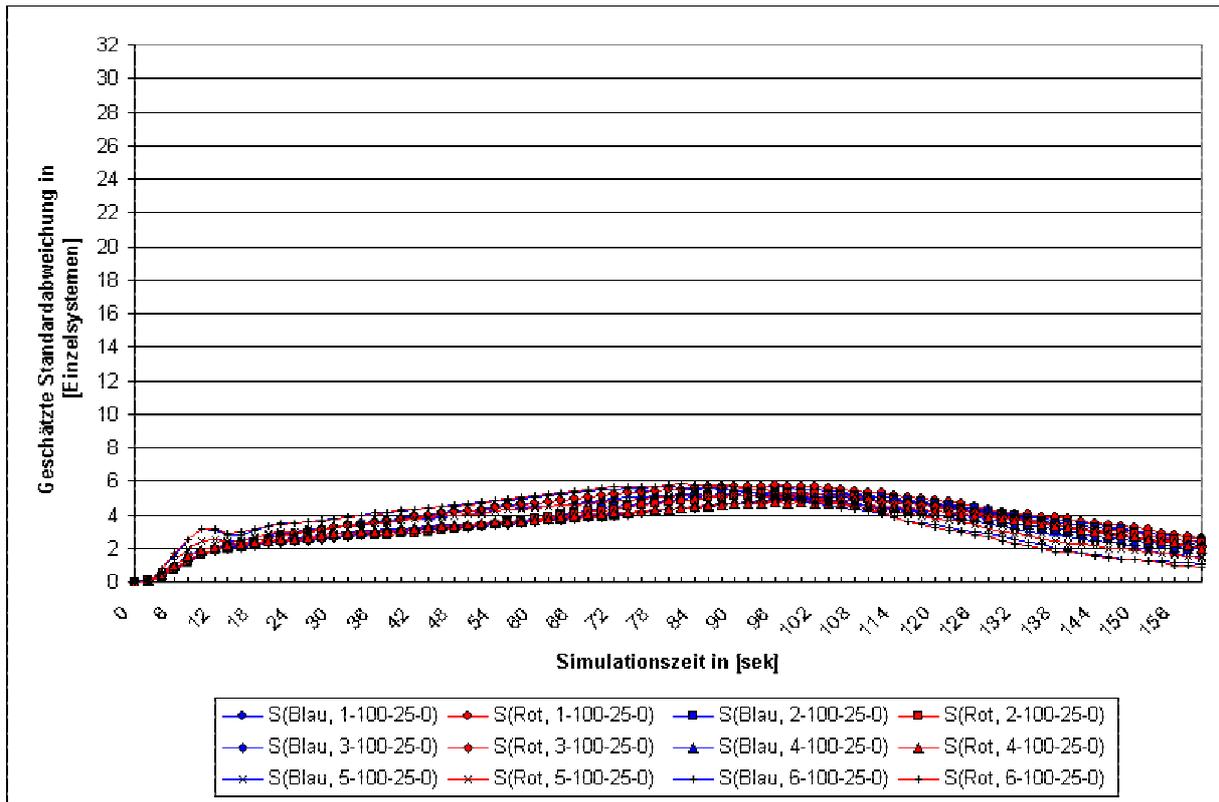


Abbildung 7.44: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-100-25-0)

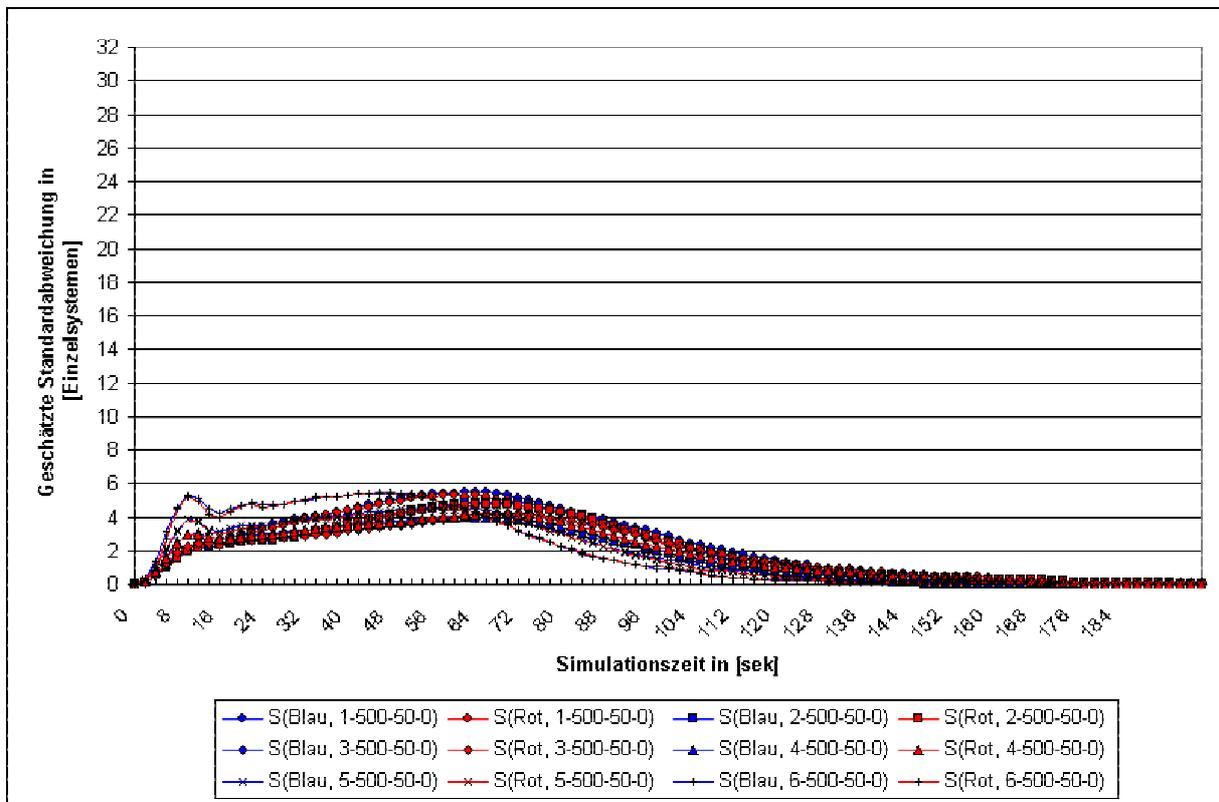


Abbildung 7.45: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-500-50-0)

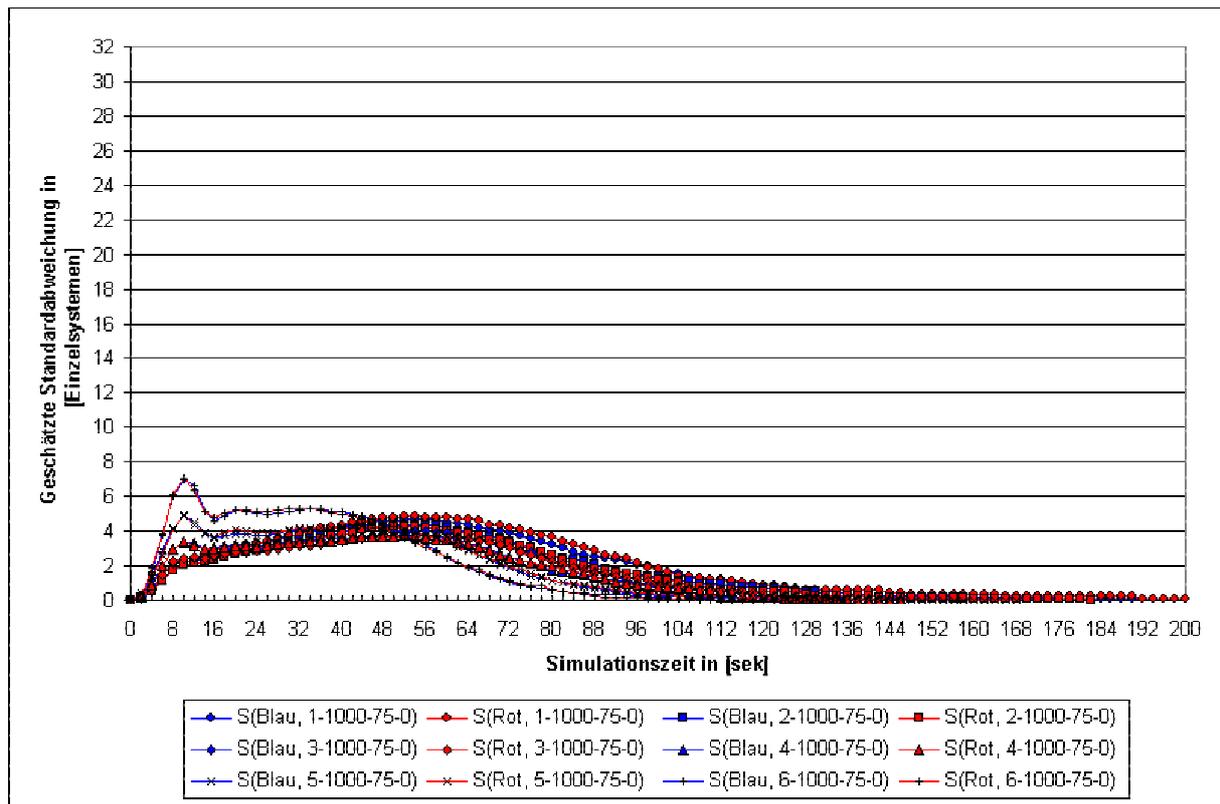


Abbildung 7.46: Verlauf der geschätzten Kräftestandardabweichungen der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-1000-75-0)

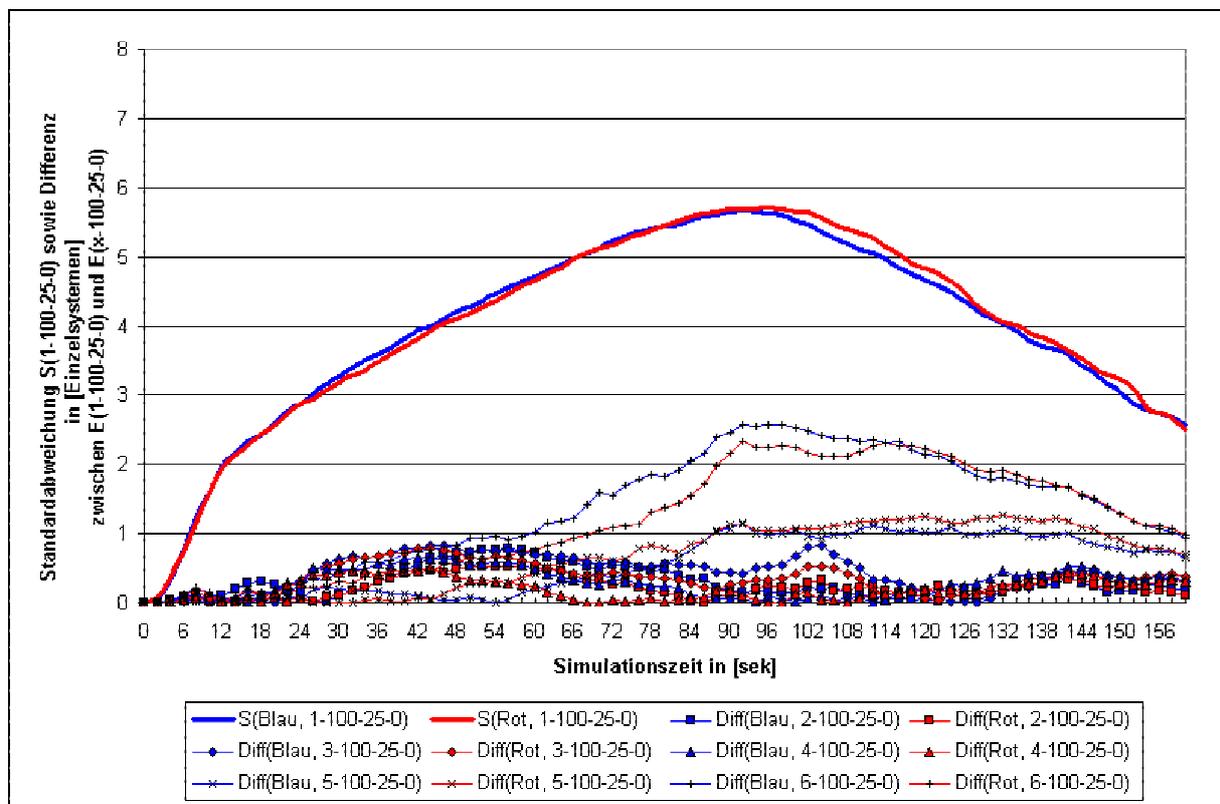


Abbildung 7.47: Differenz der Kräfteerwartungswerte der Variantengruppen 1-100-25-0 und x-100-25-0 im Vergleich zur Kräftestandardabweichung der Variante 1-100-25-0

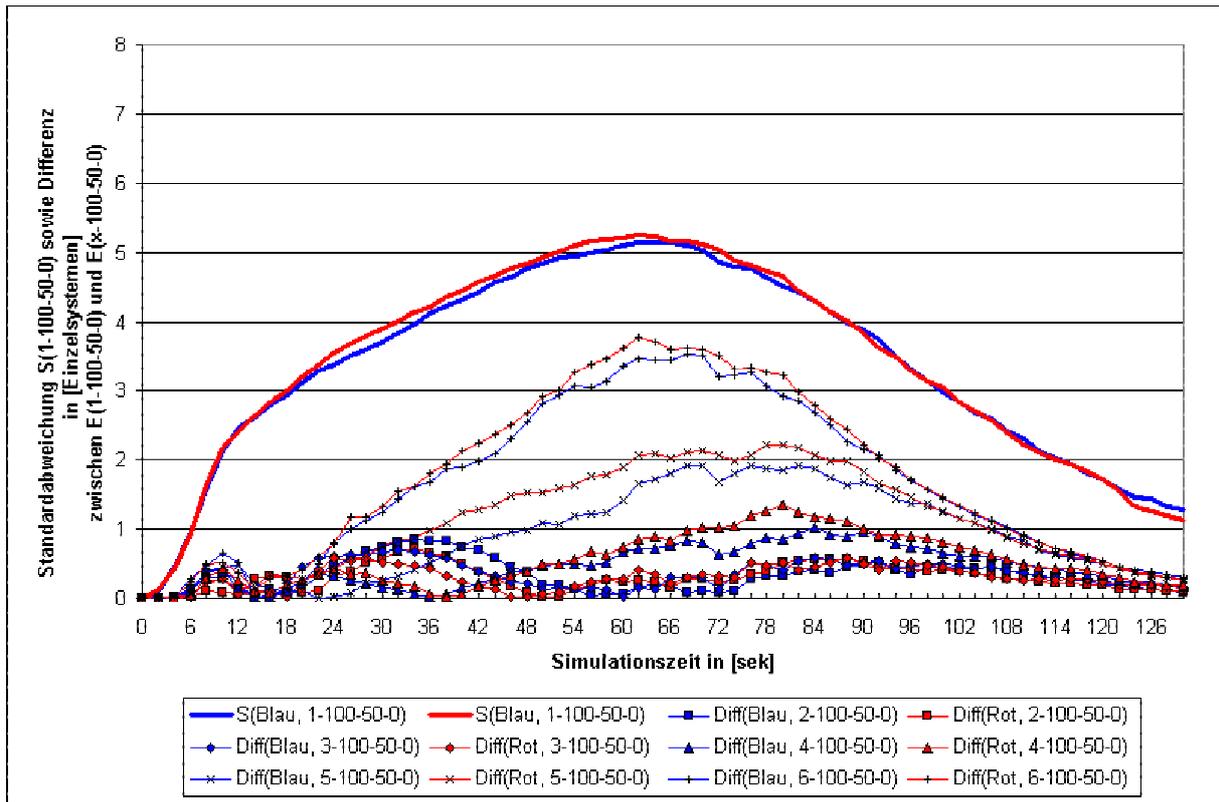


Abbildung 7.48: Differenz der Kräfteerwartungswerte der Variantengruppen 1-100-50-0 und x-100-50-0 im Vergleich zur Kräftestandardabweichung der Variante 1-100-50-0

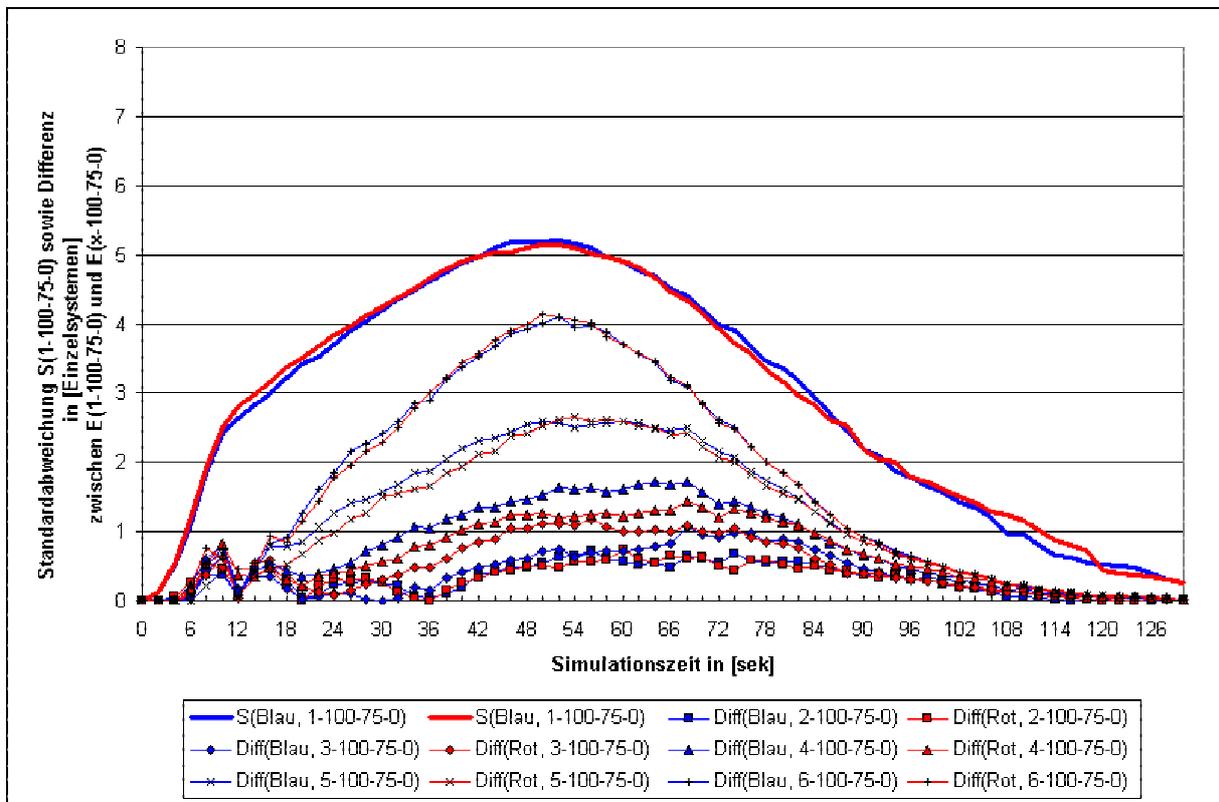


Abbildung 7.49: Differenz der Kräfteerwartungswerte der Variantengruppen 1-100-75-0 und x-100-75-0 im Vergleich zur Kräftestandardabweichung der Variante 1-100-75-0

7.2.7.6 Zusammenfassung

Bezüglich des Verlaufs der geschätzten Erwartungswerte und zugehörigen Standardabweichungen der Gesamtstärken der Parteien über der Simulationszeit kann zusammenfassend festgestellt werden, dass bei Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips grundsätzlich starke Konsistenz im Sinne der Definition von [Davis, Bigelow 98] und der hier speziell gewählten Fehlerdefinition vorliegt.

Einzig eine einseitige Veränderung der Annahmen des abgebildeten Grundszenars durch Einführung eines Feuerkoordinierungsgrades von mehr als 0%, d.h. der Übergang von unkoordiniert feuernden Einzelsystemen im nicht aggregierten Fall zu zumindest teilweise koordiniert feuernden Einzelsystemen im aggregierten Fall, führt zu Abweichungen im Verlauf der geschätzten Werte, welche die definierte Schranke überschreiten und somit zu einem Verwerfen der Konsistenzhypothese führen würden. Wie bereits gezeigt, kann dies jedoch nicht als Mangel des vorgeschlagenen Aggregationsansatzes verstanden werden. Es handelt sich hierbei um eine explizite Veränderung des abgebildeten Gefechtsgeschehens, welche die beobachteten Abweichungen gegenüber dem ursprünglichen Gefecht hervorruft.

7.2.8 Zusammenfassung zu den Ergebnissen der Versuchsreihe I

Die durchgeführten grundlegenden Untersuchungen zum Leitschützenprinzip anhand des vorgestellten Grundszenars und seiner systematischen Variation lassen dieses als Aggregationsverfahren in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen geeignet erscheinen.

Gegenüber der Einzelsystemabbildung sind bei der aggregierten Abbildung einerseits deutliche Rechenzeitgewinne festzustellen, welche mit steigender Aggregationsstufe erwartungsgemäß zunehmen.

Andererseits kann festgestellt werden, dass die als relevant betrachteten Teile der Simulationsergebnisse in Form der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der *Gewinnhäufigkeit*, der *Dauer des Gefechts*, der *Endstärke der siegreichen Partei* sowie der *Gesamtstärken der Parteien* in Abhängigkeit von der Simulationszeit durch die Aggregation Schwankungen unterliegen, welche jedoch im Sinne der hier verwendeten Definition als nicht signifikant bewertet werden können. Schwankungen bzw. Veränderungen innerhalb dieser Bewertungsgrößen, welche sich durch die beschriebenen Variationen der Kenngrößen *Gefechtsdistanz* und *Treffwahrscheinlichkeit* im nicht aggregierten Fall ergeben, werden im aggregierten Fall ebenfalls grundsätzlich wiedergegeben, so dass insgesamt von einem Vorliegen starker Konsistenz nach [Davis, Bigelow 98] gesprochen werden kann.

Ein weiteres interessantes Ergebnis der grundlegenden Untersuchungen stellen die Beobachtungen der Auswirkungen des neu eingeführten *Feuerallokationsgrades* dar. Es ist hierbei festzustellen, dass dieser sich – in signifikanter Weise – einzig auf den Verlauf der geschätzten Erwartungswerte der Gesamtstärken der Parteien über der Simulationszeit auswirkt, indem er gerade zu Beginn des Gefechts zu einer deutlich höheren Abnutzungsrate der Einzelsysteme führt. Die restlichen Bewertungsgrößen bleiben dagegen von einer Variation des Feuerkoordinierungsgrades grundsätzlich unberührt.

Es bleibt abschließend festzuhalten, dass das bisher betrachtete Grundszenar nur eine prototypische und – gerade durch die Annahme des vollständigen Vorliegens von Sichtverbindungen zwischen allen Einzelsystemen beider Parteien – idealisierte Gefechtssituation beschreibt. Von den bisher gefundenen Ergebnissen kann somit noch keine allgemeingültige Eignung des Leitschützenprinzips als Aggregationsansatz abgeleitet werden, da hierfür besonders die Ergebnisse der im Folgenden dargestellten Untersuchungen zu asymmetrischen Situationen und unterschiedlichen Sichtbedingungen von Interesse sind.

7.3 Versuchsreihe II - Untersuchungen zu dem Problemfeld der asymmetrischen Mächtigkeiten

7.3.1 Beschreibung des verwendeten Szenars und der Versuchsdurchführung

Im Zentrum der zweiten Versuchsreihe steht die Untersuchung des angesprochenen Problems asymmetrischer Mächtigkeiten²⁶⁹ sowie seine Auswirkung auf die Bewertung der Abbildungsgüte des Leitschützenprinzips.

Als Basis der Untersuchungen dient auch im Rahmen dieser Versuchsreihe grundsätzlich die bereits beschriebene symmetrische Duellsituation, in welcher sich pro Partei je 32 (auch parteiübergreifend) homogene Einzelsysteme des Typs „Schütze“ (vgl. Abbildung 7.2) gegenüberstehen. Von der vollständigen Symmetrie des Szenars der Versuchsreihe I wird nun jedoch abgewichen, indem die Parteien Blau und Rot mit unterschiedlichen Aggregationsstufen abgebildet werden. Während also die Kenngrößen

- *Distanz zwischen den Kräften beider Parteien und*
- *entfernungsunabhängige Treffwahrscheinlichkeit*

in den bekannten Ausprägungen weiterhin für beide Partei Gültigkeit besitzen, wird für den Aggregationsgrad zwischen den jeweils gewählten Ausprägungen der Parteien Blau und Rot unterschieden. Symmetrische Situationen, in welchen beide Parteien über die gleiche Aggregationsstufe verfügen würden, werden dabei nicht erneut betrachtet, da sie bereits durch die vorangegangenen Untersuchungen der Versuchsreihe I abgedeckt sind. Die dort ermittelten Werte werden bei Bedarf für die Untersuchungen dieser Versuchsreihe als Vergleichswerte herangezogen. Darüber hinaus werden spiegelbildliche Variationen, welche sich einzig durch die Vertauschung der Parteibezeichnungen Blau bzw. Rot unterscheiden ebenfalls nur in jeweils einer der beiden möglichen Variationen untersucht.

Ausgehend von den Aggregationsstufen 1 bis 5 für die Partei Blau wird die Aggregationsstufe der Partei Rot in allen demnach noch sinnvollen Ausprägungen betrachtet, so dass sich insgesamt 15 mögliche Kombinationen beider Aggregationsstufen ergeben (vgl. Tabelle 7.1).

		Aggregationsstufe Blau				
		1	2	3	4	5
Aggregations- stufe Rot	1					
	2	X				
	3	X	X			
	4	X	X	X		
	5	X	X	X	X	
	6	X	X	X	X	X

Tabelle 7.1: In Versuchsreihe II betrachtete Kombinationen an Aggregationsstufen Blau und Rot

²⁶⁹ vgl. Kapitel 5.3.2, S. 122ff

Daneben wird die Gefechtsdistanz wieder in den Ausprägungen 100m, 500m und 1.000m sowie die Treffwahrscheinlichkeit in den Ausprägungen 25%, 50% und 75% betrachtet. Der Feuerkoordinierungsgrad wird im Rahmen dieser Versuchsreihe konstant auf 0% gesetzt, um daraus eventuell resultierende zusätzliche Verfälschungen zwischen den verschiedenen Aggregationsstufen zu vermeiden.

Insgesamt ergeben sich somit 135 Varianten des Grundszenars (vgl. Abbildung 7.50), mit welchen erneut jeweils 1.000 Simulationsläufe (Replikationen) durchgeführt werden.

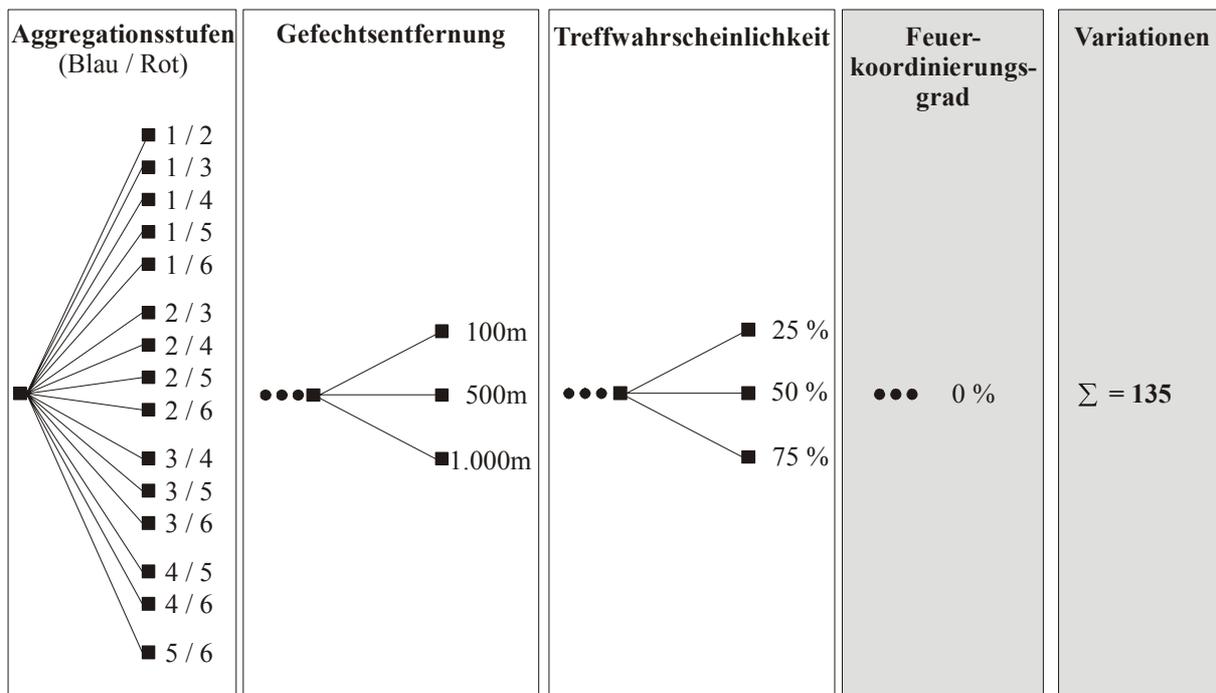


Abbildung 7.50: In Versuchsreihe II betrachtete Varianten des Grundszenars

7.3.2 Bezeichnung der Grundszenarvarianten in der Versuchsreihe II

Im Folgenden wird grundsätzlich die in Versuchsreihe I eingeführte 4-teilige Bezeichnungsweise einzelner Varianten bzw. Gruppen von Varianten des Grundszenars weiterverwendet.

Da im Rahmen der Versuchsreihe II jedoch nicht mehr von einer einheitlichen Aggregationsstufe der Parteien Blau und Rot ausgegangen werden kann, wird diese Bezeichnungsweise geeignet abgeändert. Der erste Eintrag beschreibt nun – statt der bisher allgemeingültigen Aggregationsstufe beider Parteien – explizit die jeweiligen Aggregationsstufen von Blau und Rot. Die Bezeichnung einer Variante setzt sich somit in der entsprechenden Reihenfolge zusammen aus:

Aggregationsstufe Blau / Aggregationsstufe Rot – Gefechtsentfernung - Treffwahrscheinlichkeit – Feuerkoordinierungsgrad (=0%).

Dies bedeutet, dass zum Beispiel die Bezeichnung *2/4-100-25-0* eine Variante des Grundszenars beschreibt, in welcher die Partei Blau auf der Aggregationsstufe 2, d.h. mit einer Anfangsmächtigkeit von 2 Einzelsystemen pro Gefechtselement, und die Partei Rot auf der Aggregationsstufe 4, d.h. mit einer Anfangsmächtigkeit von 8 Einzelsystemen pro Gefechtselement, abgebildet wird. Die restlichen Kenngrößen bezeichnen wie gehabt eine Kampfdistanz von 100m, eine Treffwahrscheinlichkeit von 25% sowie einen Feuerkoordinierungsgrad von 0%.

Der Feuerkoordinierungsgrad unterliegt mit konstanten 0% innerhalb dieser Versuchsreihe keiner Variation, wird aber zur Wahrung der Konsistenz in der Bezeichnungsweise weiter angegeben.

Die Ersetzung einer oder mehrerer der Kenngrößen innerhalb dieser Bezeichnungsweise durch Variablen dient erneut zur Ansprache der Menge aller Varianten des Grundszenars, welche über die durch die explizit angegebenen Kenngrößen bezeichneten Ausprägungen verfügen.

7.3.3 Bewertung des Rechenzeitverhaltens

Die Auswertung aller erhaltenen Ergebnisse der Versuchsreihe II lässt erkennen, dass auch eine asymmetrische Erhöhung der Aggregationsstufe nur einer der beiden Parteien zu einer deutlichen Verringerung des geschätzten Erwartungswertes sowie der zugehörigen Standardabweichung der pro Simulationslauf benötigten **Rechenzeit** führt (vgl. Abbildung 7.51).

Da nun nur eine Partei einer Erhöhung der Aggregationsstufe unterliegt, fällt die zu beobachtende Verringerung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen geringer aus als dies im Rahmen der Versuchsreihe I bei gleichzeitiger Erhöhung der Aggregation beider Parteien der Fall war. Dieser Effekt resultiert in natürlicher Weise aus den in Kapitel 5.2 genannten Ursachen für das verbesserte Rechenzeitverhalten der aggregierten Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips, d.h. zum Einen aus der reduzierten Anzahl (parallel) zu verwaltender Ereignisse sowie zum Anderen aus der ebenfalls reduzierten Anzahl zeitintensiver Geländeschnitte zur Sichtlinienbestimmung zwischen Gefechts-elementen.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe lassen ferner den Schluss zu, dass der durch asymmetrische Erhöhung der Aggregationsstufe einer Partei zu erwartende prozentuale Rechenzeitgewinn einzig von den beiden Aggregationsstufe abhängt, zwischen denen gewechselt wird (vgl. Abbildung 7.52). Die jeweiligen Ausprägungen der restlichen Kenngrößen einer Grundzenarvariante haben – wie in Versuchsreihe I – nur Einfluss auf das absolute Niveau der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen. Eine Variation der Gefechtsdistanz bzw. Treffwahrscheinlichkeit resultiert somit in den bereits bei Versuchsreihe I beschriebenen Effekten.

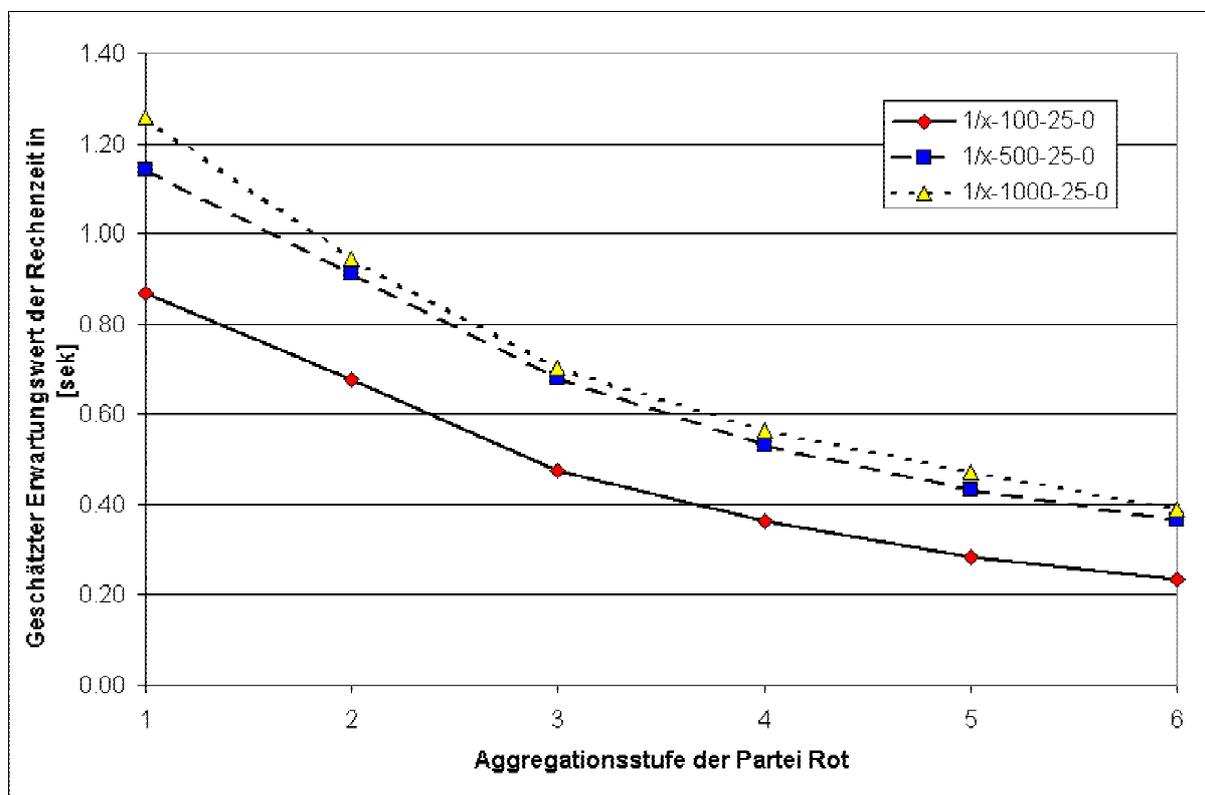


Abbildung 7.51: Verlauf des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit pro Simulationslauf (Variantengruppe 1/x-y-25-0)

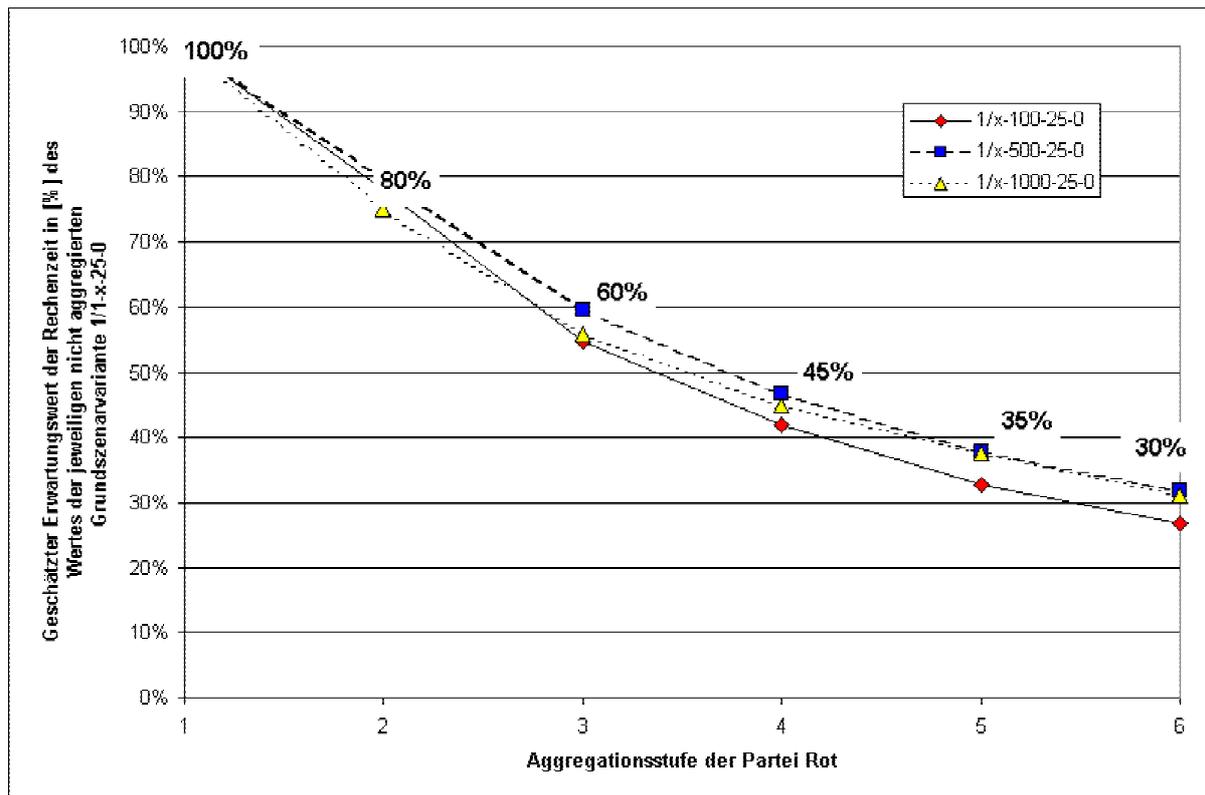


Abbildung 7.52: Verlauf des geschätzten Erwartungswertes der Rechenzeit pro Simulationslauf (Variantengruppe $1/x-y-25-0$) (Als Prozent des Wertes der nicht aggregierten Grundszenarvariante $1/1-x-25-0$)

7.3.4 Konsistenzbewertung bezüglich der Gewinnhäufigkeit

7.3.4.1 Grundsätzliche Aussagen

Bereits im Rahmen der theoretischen Überlegungen zu möglichen Problemen des Leitschützenprinzips wurde dargestellt, dass asymmetrische Mächtigkeiten – gerade bei hohen Treffer- und Vernichtungswahrscheinlichkeiten – zu einer Verschiebung der Gewinnwahrscheinlichkeiten der einzelnen Parteien zu Gunsten der weniger stark aggregierten Partei führen können. Für die Versuchsreihe II stellt deshalb die Konsistenzbewertung der **relativen Gewinnhäufigkeiten** der Parteien Blau und Rot den zentralen Untersuchungsgegenstand dar.

Eine Betrachtung aller erhaltenen Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit Blick auf die relativen Gewinnhäufigkeiten der Parteien lässt die folgenden Aussagen zu:

- Eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* der Partei Rot führt grundsätzlich zu einem Anstieg der relativen Gewinnhäufigkeit der Partei Blau (vgl. Kapitel 7.3.4.3).
- Eine Erhöhung der *entfernungsunabhängigen Treffwahrscheinlichkeit* führt bei asymmetrischen Aggregationsstufen ebenfalls zu einem Anstieg der Gewinnhäufigkeiten der schwächer aggregierten Partei (vgl. Kapitel 7.3.4.3).
- Eine Erhöhung der *Gefechtsdistanz* führt grundsätzlich zu einem tendenziellen Anstieg der Gewinnhäufigkeiten der schwächer aggregierten Partei (vgl. Kapitel 7.3.4.2).

7.3.4.2 Analyse der Auswirkungen der Gefechtsdistanz

Eine Erhöhung der *Gefechtsdistanz* führt im Fall asymmetrischer Aggregationsstufen grundsätzlich zu einem tendenziellen Anstieg der relativen Gewinnhäufigkeit der schwächer aggregierten Partei Blau (vgl. Abbildung 7.53). Dieser Anstieg fällt besonders deutlich aus, wenn die Partei Blau auf der Aggregationsstufe 1, d.h. nicht aggregiert, abgebildet wird. Mit zunehmender Aggregationsstufe der Partei Blau – bei genereller Beibehaltung der Asymmetrie der Aggregationsstufen – lässt die beobachtete Zunahme der Gewinnhäufigkeit nach, bis schließlich keine signifikanten Unterschiede mehr festzustellen sind. Die Ursache für diese Beobachtung liegt zum Einen in der bereits beschriebenen Auswirkung einer Erhöhung der Gefechtsdistanz auf die modifizierte Entdeckungswahrscheinlichkeit sowie zum Anderen in dem in SAMBA gewählten Ansatz der einseitig individuelle Entdeckung.²⁷⁰

Der Ansatz der einseitig individuellen Entdeckung in der in SAMBA implementierten zweiten Ausführung besagt, dass alle Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes über ein stets identisches Zielspektrum verfügen, d.h. dass Einzelsysteme die Informationen über entdeckte feindliche Einzelsysteme praktisch zeitverzugslos²⁷¹ an alle anderen Einzelsysteme des jeweiligen aggregierten Gefechtselementes weitergeben. Dies hat zur Folge, dass bei konstanter Entdeckungswahrscheinlichkeit im aggregierten Fall nach Abschluss eines Zielaufklärungsprozesses eine im Mittel höhere Anzahl an Einzelsystemen einer Partei die gleichen feindlichen Einzelsysteme entdeckt hat, als dies bei nicht aggregierter Abbildung der Fall wäre. Aus dieser Tatsache resultiert – bei Verzicht auf eine Koordination des Feuers innerhalb bzw. zwischen aggregierten Gefechtselementen – eine im Mittel im aggregierten Fall ebenfalls erhöhte Anzahl an Doppelbekämpfungen.

Eine Erhöhung der Gefechtsdistanz führt in dem in SAMBA verwendeten Zielaufklärungsmodell grundsätzlich zu einer Verringerung der modifizierten Entdeckungswahrscheinlichkeit.²⁷² Aus dieser Tatsache resultiert jedoch automatisch auch eine geringere Wahrscheinlichkeit dafür, dass mehrere individuelle Einzelsysteme, d.h. solche Einzelsysteme, welche nicht gemeinsam in einem aggregierten Gefechtselement zusammengefasst sind, die gleichen feindlichen Einzelsysteme entdecken. Dies führt aber wiederum im Mittel zu stärker divergierenden Zielspektren der individuellen Einzelsysteme und somit zu einer geringeren Zahl an Doppelbekämpfungen. Im aggregierten Fall tritt dieser Effekt zwar analog zwischen den aggregierten Gefechtselementen auf, jedoch aufgrund der gewählten Modellierung nicht zwischen den Einzelsystemen eines einzelnen aggregierten Gefechtselementes. Mit steigender Aggregationsstufe führt eine Zunahme der Gefechtsdistanz somit zu einer immer schwächeren Abnahme der Zahl an Doppelbekämpfungen.

Beide Effekte führen gemeinsam dazu, dass im Fall der asymmetrischen Aggregation der Parteien Blau und Rot die schwächer aggregierte Partei Blau durch ihre im Mittel geringere Zahl an Doppelbekämpfungen gegenüber der stärker aggregierten Partei Rot – gerade bei hohen Treff- und Vernichtungswahrscheinlichkeiten – tendenziell im Vorteil ist. Dieser Vorteil spiegelt sich in dem beobachteten Anstieg der relativen Gewinnhäufigkeit der Partei Blau wider.

²⁷⁰ vgl. Kapitel 5.1.4.2, S. 107ff

²⁷¹ Die Weitergabe dieser Information kann im Modell als „praktisch zeitverzugslos“ angesehen werden, da sie stets vor einem anschließenden Zielauswahl- bzw. Bekämpfungsprozess erfolgt.

²⁷² vgl. Kapitel 6.1.4.2, S. 133ff

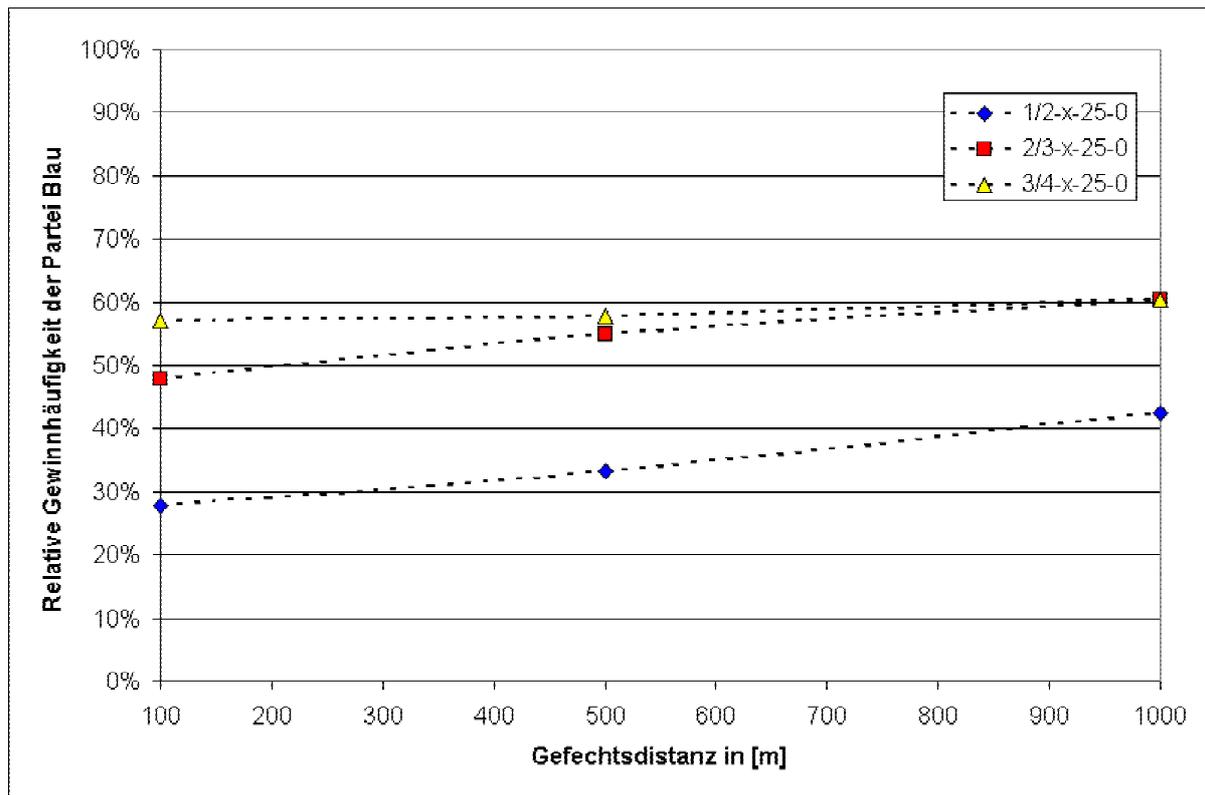


Abbildung 7.53: Zunahme der relativen Gewinnhäufigkeit der schwächer aggregierten Partei Blau bei Steigerung der Gefechtsdistanz (Variantengruppen 1/2-x-25-0, 2/3-x-25-0 und 3/4-x-25-0)

7.3.4.3 Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe und der Treffwahrscheinlichkeit

Die Ergebnisse der Versuchsreihe II lassen den Schluss zu, dass im Fall asymmetrischer Mächtigkeiten bei einer Erhöhung der *Aggregationsstufe* der Partei Rot die relative Gewinnhäufigkeit der schwächer aggregierten Partei Blau grundsätzlich zunimmt. Eine gleichzeitige Erhöhung der entfernungsunabhängigen *Treffwahrscheinlichkeit* verstärkt diesen Effekt zusätzlich (vgl. Abbildung 7.54). Die Ursachen für diese Beobachtungen liegen in der – für die Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips typischen – Beschränkung der individuellen Aktionsmöglichkeiten auf aggregierte Gefechts Elemente. Bei asymmetrischen Mächtigkeiten ist diese Beschränkung besonders in Verbindung mit hohen Treff- und Vernichtungswahrscheinlichkeiten geeignet, gemäß den bereits in Kapitel 5.3.2 dargestellten theoretischen Überlegungen zu einer Verschiebung der Gewinnchancen zu Gunsten der schwächer aggregierten Partei zu führen.

Von den in Versuchsreihe II erhaltenen Daten bilden einzig die Ergebnisse der Grundszenarvarianten der Variantengruppen 1/2-100-y-0 sowie 1/3-100-y-0 eine Ausnahme von diesem Effekt. Bei diesen Grundszenarvarianten ist entgegen den sonstigen Beobachtungen sowie den dargestellten theoretischen Überlegungen eine höhere relative Gewinnhäufigkeit auf Seiten der stärker aggregierten Partei Rot zu beobachten (vgl. Abbildung 7.55). Eine Auswertung der Detailprotokolle dieser Variantengruppen zeigt, dass dieser scheinbar widersprüchliche Effekt seine Ursache primär in der in SAMBA verwendeten Zielauswahlvorschrift²⁷³ hat.

²⁷³ vgl. Kapitel 6.1.4.3, S. 138ff

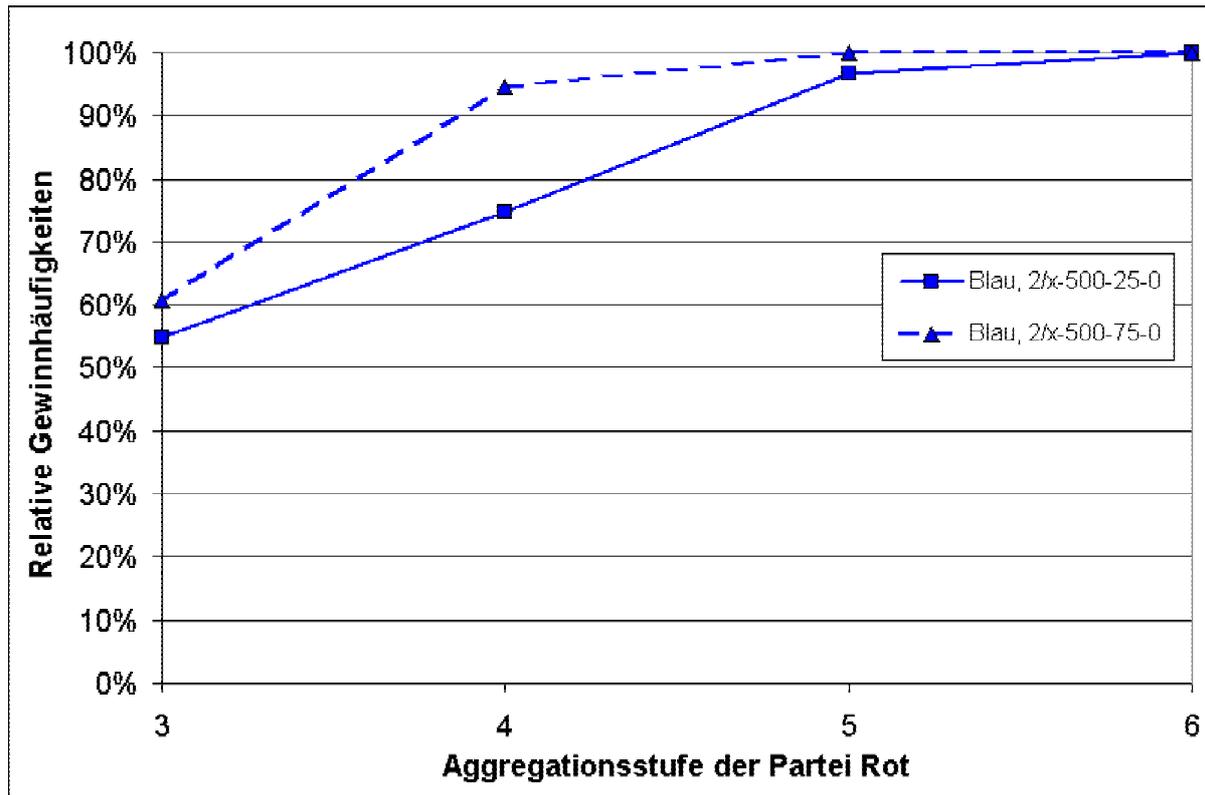


Abbildung 7.54: Relative Gewinnhäufigkeit der Partei Blau (Variantengruppen 2/x-500-25-0 und 2/x-500-75-0)

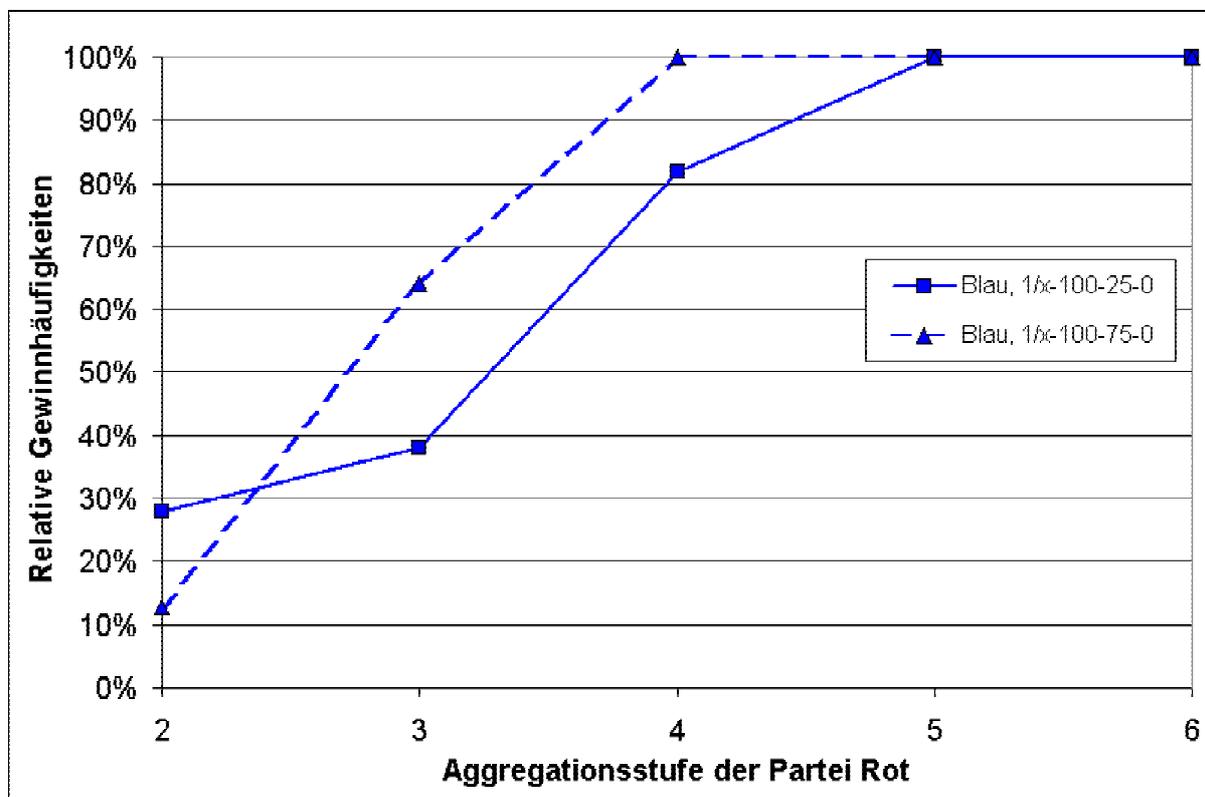


Abbildung 7.55: Relative Gewinnhäufigkeit der Partei Blau (Variantengruppen 1/x-100-25-0 und 1/x-100-75-0)

Die simulierten Gefechte der Variantengruppen 1/2-x-y-0 sowie 1/3-x-y-0 zeichnen sich ob der geringen Gefechtsdistanz durch die Tatsache aus, dass Einzelsysteme bzw. aggregierte Gefechtselemente feindliche Einzelsysteme mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% entdecken. Dies führt dazu, dass individuelle Einzelsysteme der Partei Blau bzw. aggregierte Gefechtselemente der Partei Rot nach Durchführung eines Zielaufklärungsprozesses stets sämtliche – zu diesem Simulationszeitpunkt gegenüber Flachfeuer erleideraktiven – feindlichen Einzelsysteme entdeckt haben und somit theoretisch bekämpfen könnten. Die nur geringen Unterschiede der Aggregationsstufen beider Parteien führen dazu, dass der sonst zu beobachtende Effekt gerade zu Beginn eines simulierten Gefechts praktisch nicht auftritt, so dass sich eine gleichmäßige Abnutzung der Kräfte der Parteien Blau und Rot ergibt. Festzustellen ist dabei jedoch, dass aufgrund der verwendeten Zielauswahlvorschrift durch die jeweils verbleibenden Einzelsysteme der Partei Blau bevorzugt solche aggregierten Gefechtselemente der Partei Rot bekämpft werden, welche noch über 2 (bzw. 3) gegenüber Flachfeuer erleideraktive Einzelsysteme verfügen. Dieses Vorgehen führt unterschiedlich schnell zu einer Situation, in welcher beide Parteien über eine praktisch gleiche Anzahl verbleibender Einzelsysteme verfügen, wobei Partei Rot diese – bis auf wenige Ausnahmen – in aggregierten Gefechtselementen der Mächtigkeit 1 zusammenfasst (vgl. Abbildung 7.56). Ab diesem Simulationszeitpunkt werden somit beide Parteien bei gleicher Stärke prinzipiell nicht aggregiert dargestellt, wovon nur noch Partei Rot mit einigen wenigen aggregierten Gefechtselementen höherer Mächtigkeit abweicht. Die verwendete Zielauswahlvorschrift führt nun dazu, dass ein deutlicher Anteil der Einzelsysteme der Partei Blau ihr Feuer auf die verbliebenen aggregierten Gefechtselemente der Partei Rot konzentriert, welche noch über mehr als ein erleideraktives Einzelsystem verfügen. Diese aggregierten Gefechtselemente wirken somit als „**Feuerschwämme**“, da praktisch die ganze Feuerkraft der Partei Blau auf sie konzentriert wird und somit nicht zur Bekämpfung weiterer roter Gefechtselemente zur Verfügung steht. Dies resultiert zum Einen aus der im Rahmen sämtlicher Versuchsreihen zu Grunde gelegten gleichmäßigen Gewichtung der einzelnen Teilnutzenwerte der Zielauswahlnutzenfunktion sowie zum Anderen aus der geringen räumlichen Dislozierung der Einzelsysteme beider Parteien. In Kombination führen diese beiden Faktoren offensichtlich dazu, dass die verbliebenen aggregierten Gefechtselemente mit mehr als einem erleideraktiven Einzelsystem im Rahmen der Zielauswahl der Einzelsysteme der Partei Blau grundsätzlich höher bewertet und somit auch häufiger bekämpft werden. Da es sich bei den verbliebenen aggregierten Gefechtselementen der Partei Rot überwiegend um solche der Mächtigkeit 1 handelt, welche praktisch mit individuellen Einzelsystemen gleichzusetzen sind, ist die Partei Rot in der Lage, ihr Feuer gleichmäßig über das verbliebene blaue Zielspektrum zu verteilen.²⁷⁴ Es kommt somit auf Seite der Partei Blau notwendigerweise zu einer erhöhten Anzahl an Doppelbekämpfungen, welche schlussendlich in der beobachteten höheren Gewinnchance der Partei Rot resultieren. Eine Erhöhung der entfernungsunabhängigen Treffwahrscheinlichkeit verstärkt diesen Effekt zusätzlich (vgl. Abbildung 7.55), da im Falle geringer Treffwahrscheinlichkeiten Doppelbekämpfungen einen weniger deutlichen Einfluss auf das Gefechtsgeschehen besitzen bzw. im Extremfall sogar vorteilhaft sein können.

²⁷⁴ Da die Partei Blau in diesen Grundzenarvarianten stets nicht aggregiert, d.h. durch individuelle Einzelsysteme dargestellt wird, erfolgt die Zielauswahl der aggregierten Gefechtselemente der Partei Rot einzig anhand des Entfernungskriteriums. Aufgrund der linearen Aufstellung beider Parteien erlaubt dieses jedoch eine meist sehr gute Feuerverteilung.

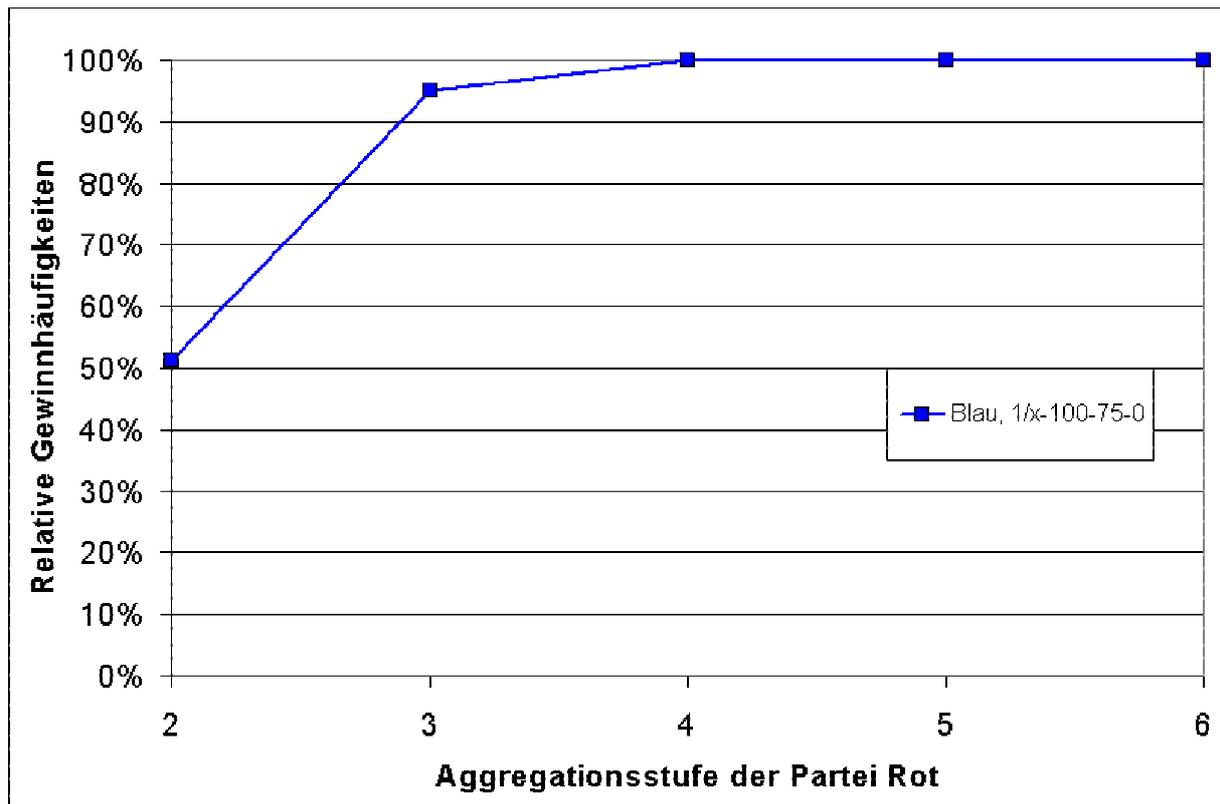


Abbildung 7.57: Relative Gewinnhäufigkeit der Partei Blau bei modifizierter Zielauswahlvorschrift (Variantengruppe 1/x-100-75-0)

7.3.4.4 Zusammenfassung

Die gefundenen Ergebnisse machen deutlich, dass bei Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips im Fall asymmetrischer Mächtigkeiten das vermutete Problem einer Verschiebung der Gewinnchancen zu Gunsten der schwächer aggregierten Partei tatsächlich auftritt und somit die Konsistenz zwischen aggregierter und nicht aggregierter Abbildung in dieser wesentlichen Bewertungsgröße verletzt wird. Eine Erhöhung der Gefechtsdistanz oder der Treffwahrscheinlichkeit ist geeignet, diesen Effekt zu verstärken. Zusätzlich kann jedoch festgestellt werden, dass in solchen Fällen, in denen eine der beiden Parteien nicht aggregiert sowie die zweite Partei nur schwach aggregiert abgebildet wird, die jeweils verwendete Zielauswahlvorschrift gegebenenfalls durch das Auftreten des beschriebenen „Feuerschwamm“-Effektes einen wesentlichen Einfluss auf das Gefechtsgeschehen und –ergebnis besitzt. Die Asymmetrie der Mächtigkeiten wirkt sich dann zu Gunsten der (stärker) aggregierten Partei aus. Eine geeignete Anpassung der Gewichtungsfaktoren der Teilnutzenwerte vor oder während eines Simulationslaufes kann dabei allerdings Abhilfe schaffen.

7.3.5 Konsistenzbewertung bezüglich der Gefechtsdauer und Endstärke

Im Rahmen der Versuchsreihe II kommt den Bewertungsgrößen **Gefechtsdauer** und **Endstärke der siegreichen Partei** gegenüber den relativen Gewinnhäufigkeiten der Parteien nur eine untergeordnete Bedeutung zu, so dass auf eine detaillierte Betrachtung verzichtet werden kann. Bereits im Rahmen der Konsistenzbewertung der Gewinnhäufigkeit konnte festgestellt werden, dass im Fall asymmetrischer Mächtigkeiten auf Grund der Verschiebung der relativen Gewinnhäufigkeiten zu Gunsten der schwächer aggregierten Partei bei Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips keine Konsistenz im Sinn der verwendeten Definition vorhanden ist. Eine Betrachtung der beiden Bewertungsgrößen Gefechtsdauer und Endstärke der siegreichen Partei ist geeignet, diese Feststellung noch zu bestärken.

Im Fall asymmetrischer Mächtigkeiten führt eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* der stärker aggregierten Partei Rot zu einem tendenziellen Anstieg des geschätzten Erwartungswertes der Endstärke der siegreichen Partei (Blau) sowie zu einer tendenziellen Abnahme des ebenfalls geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer. Die zu beobachtenden Abweichungen fallen dabei so deutlich aus, dass sie im Sinne der verwendeten Definition als signifikant bewertet werden müssen und damit ebenfalls das Konsistenzkriterium verletzen.

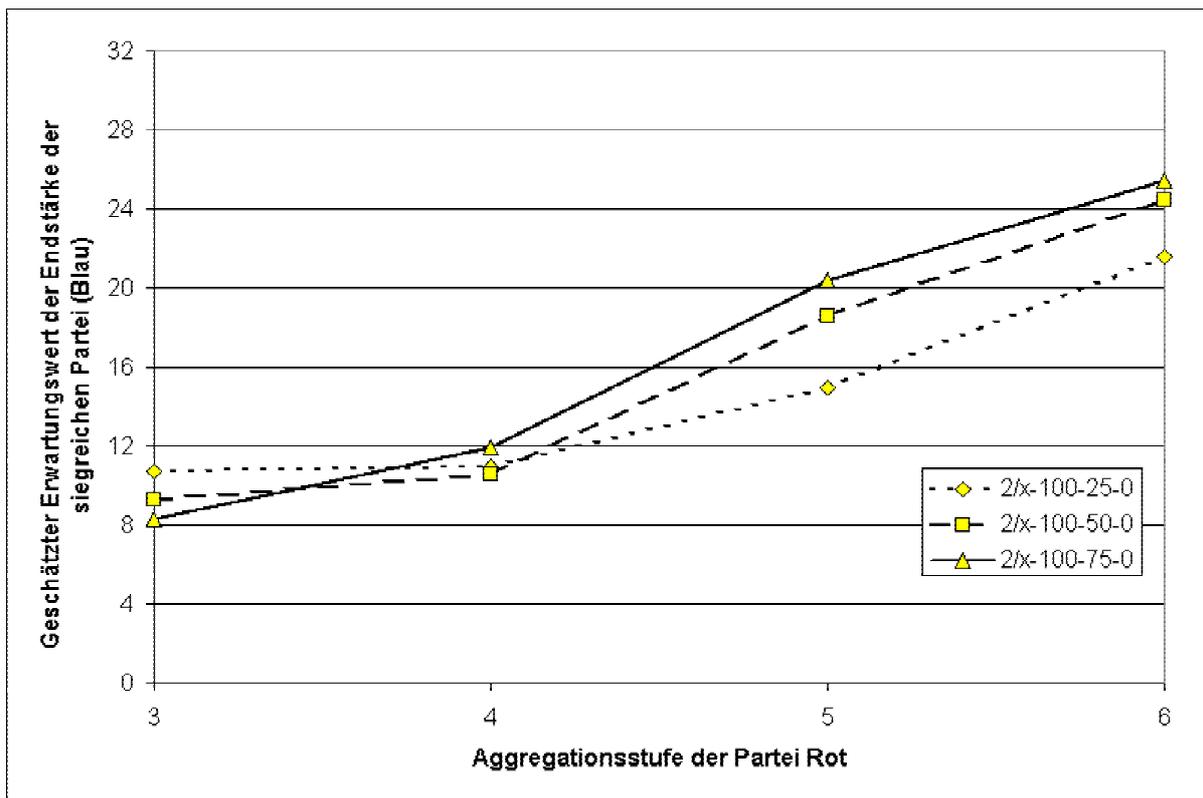


Abbildung 7.58: Anstieg des geschätzten Erwartungswertes der Endstärke der siegreichen Partei (Blau) bei Erhöhung der Aggregationsstufe der Partei Rot (Variantengruppe 2/x-100-y-0)

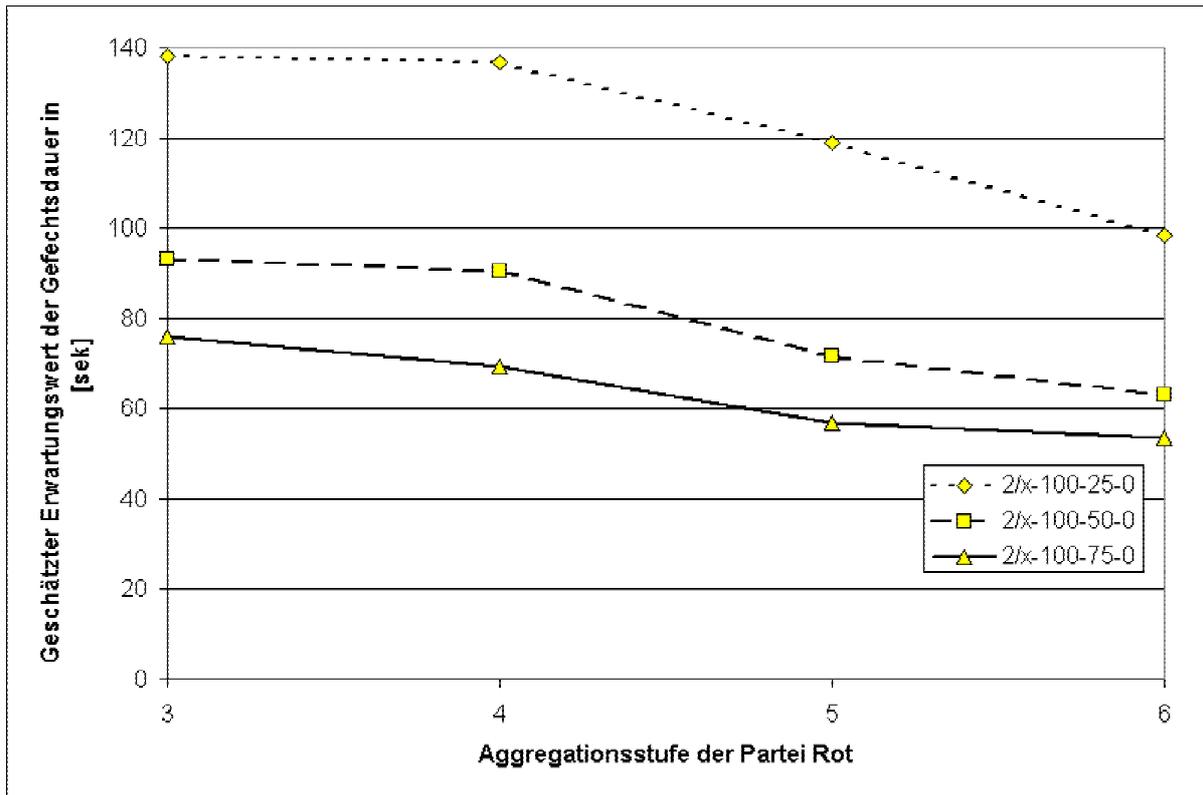


Abbildung 7.59: Abnahme des geschätzten Erwartungswertes der Gefechtsdauer bei Erhöhung der Aggregationsstufe der Partei Rot (Variantengruppe 2/x-100-y-0)

7.3.6 Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs

Die in Versuchsreihe II erhaltenen Verläufe der geschätzten Erwartungswerte und zugehörigen Standardabweichungen der **Gesamtstärken** der Parteien über der Simulationszeit²⁷⁷ unterstützen die vorangegangenen Überlegungen zur Entwicklung der relativen Gewinnhäufigkeiten bei asymmetrischer Aggregation der Parteien Blau und Rot.

Eine Betrachtung des Verlaufs des geschätzten Kräfteerwartungswertes der Grundszenarvariante 1/2-100-25-0 (vgl. Abbildung 7.60) etwa, lässt eindeutig den Zeitpunkt des Auftretens des „Feuerschwamm“-Effektes²⁷⁸ erkennen, zu dem die bis dahin gleichmäßige Abnutzung beider Parteien endet und die stärker aggregierte Partei Rot gegenüber Partei Blau einen Vorteil erhält, welcher sich schlussendlich in einer gesteigerten relativen Gewinnhäufigkeit widerspiegelt.

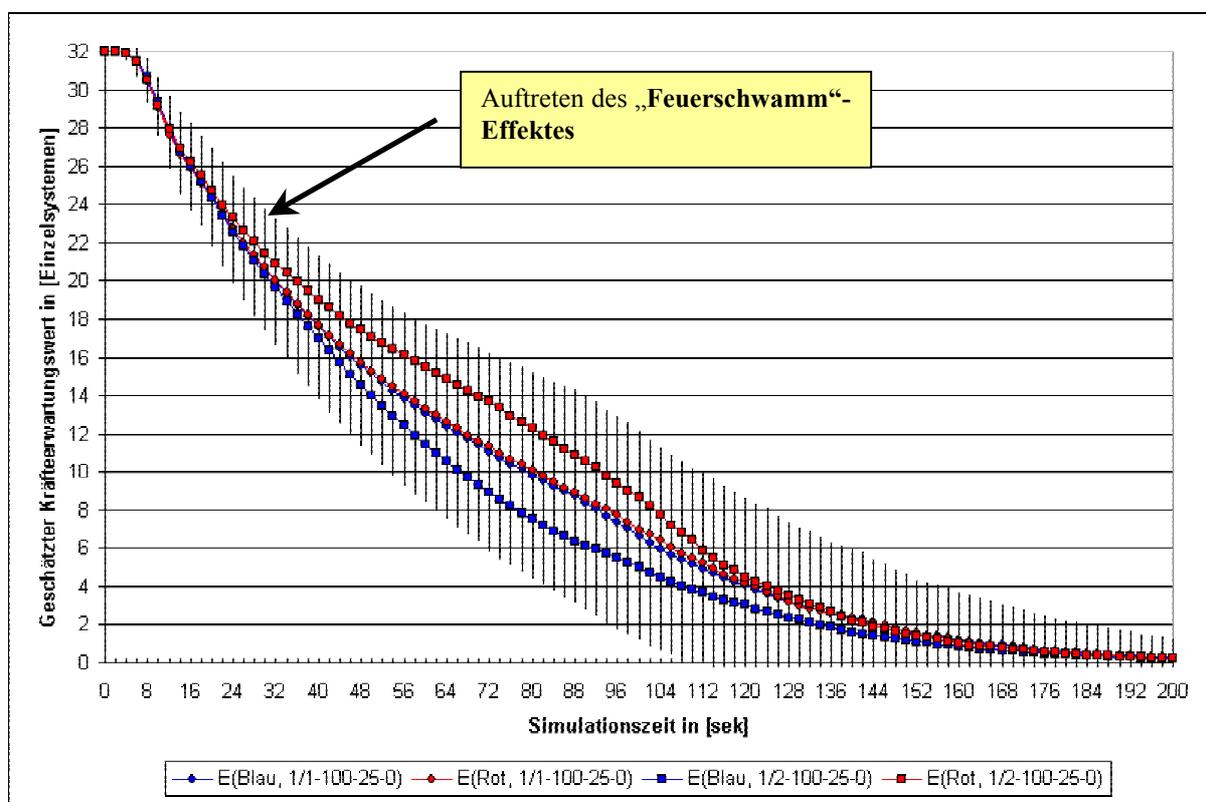


Abbildung 7.60: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Grundszenarvarianten 1/1-100-25-0 und 1/2-100-25-0)

Eine Betrachtung des Verlaufs des geschätzten Kräfteerwartungswertes der Grundszenarvariante 1/6-100-25-0 (vgl. Abbildung 7.61) dagegen zeigt, dass bei einem *großen Unterschied der Aggregationsstufen* der Parteien Blau und Rot der beschriebene „Feuerschwamm“-Effekt nicht mehr auftritt, da nun bereits zu Beginn eines Gefechts die gleichmäßigere Feuerverteilung der nicht aggregierten Partei Blau zu einer ungleichmäßigen Abnutzung der beiden Parteien führt. Die gegenüber Partei Rot deutlich schwächere Abnutzung der Partei Blau begründet den zu beobachtenden signifikanten Anstieg der relativen Gewinnhäufigkeit dieser Partei.

²⁷⁷ Im Folgenden wiederum kurz als Kräfteerwartungswert bzw. Kräftestandardabweichung bezeichnet.

²⁷⁸ vgl. Kapitel 7.3.4.3, S. 212ff

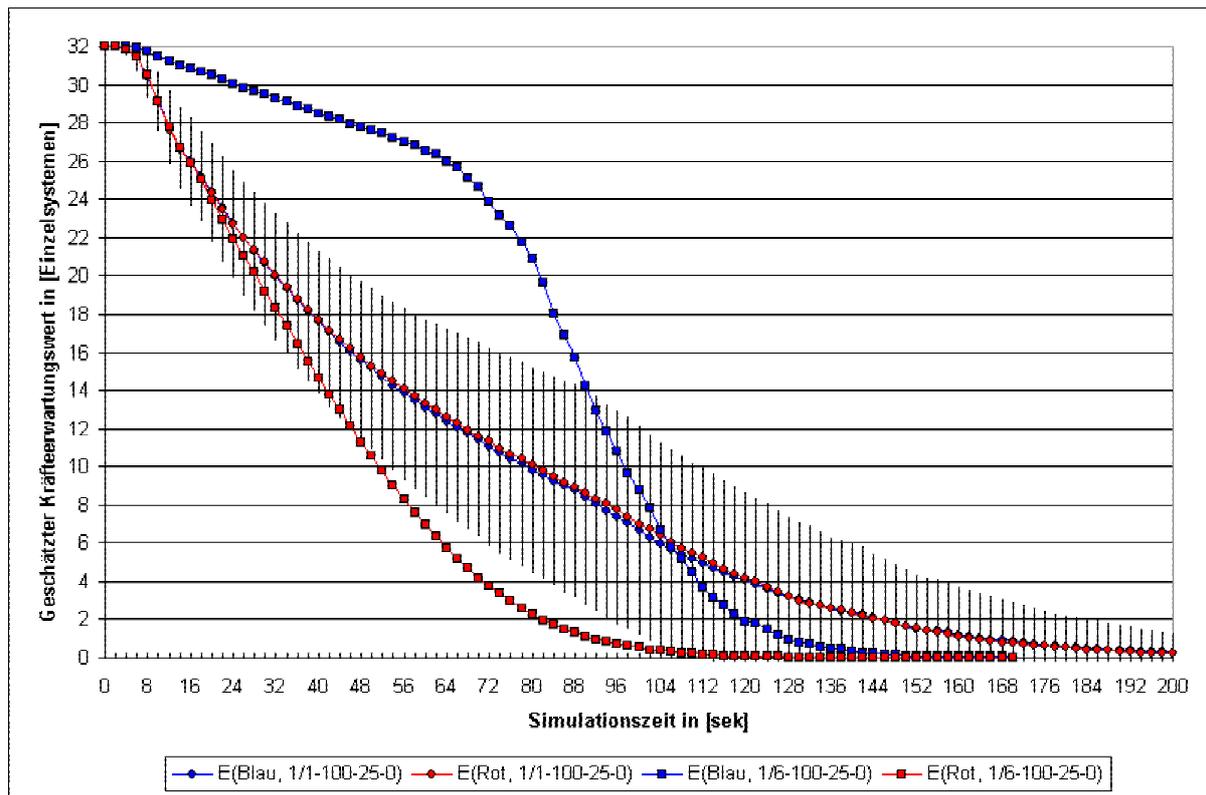


Abbildung 7.61: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Grundszenarvarianten 1/1-100-25-0 und 1/6-100-25-0)

Eine exemplarische Analyse des Verlaufs des Kräfteerwartungswertes der Grundszenarvarianten 2/3-100-25-0 sowie 2/3-100-75-0 verdeutlicht die Auswirkungen einer erhöhten *Treffwahrscheinlichkeit* auf den Effekt der Verschiebung der Gewinnchancen zu Gunsten der schwächer aggregierten Partei Blau.

Tritt der beschriebene Effekt bei einer geringen Treffwahrscheinlichkeit von 25% praktisch überhaupt nicht auf (vgl. Abbildung 7.62), so dass dabei im Sinne der verwendeten Definition starke Konsistenz bezüglich des Verlaufs des Kräfteerwartungswertes herrscht, führt eine Erhöhung der Treffwahrscheinlichkeit auf 75% zu einem deutlichen Vorteil der Partei Blau, welcher sich in einer wesentlich geringeren Abnutzung dieser Partei widerspiegelt (vgl. Abbildung 7.63). Die im Rahmen der theoretischen Überlegungen sowie der Konsistenzbewertung der Gewinnhäufigkeit bereits unterstellte bzw. festgestellte Bedeutung der Treffwahrscheinlichkeit für das Problem asymmetrischer Mächtigkeiten kann somit auch anhand der Verläufe der Kräfteerwartungswerte nachvollzogen werden.

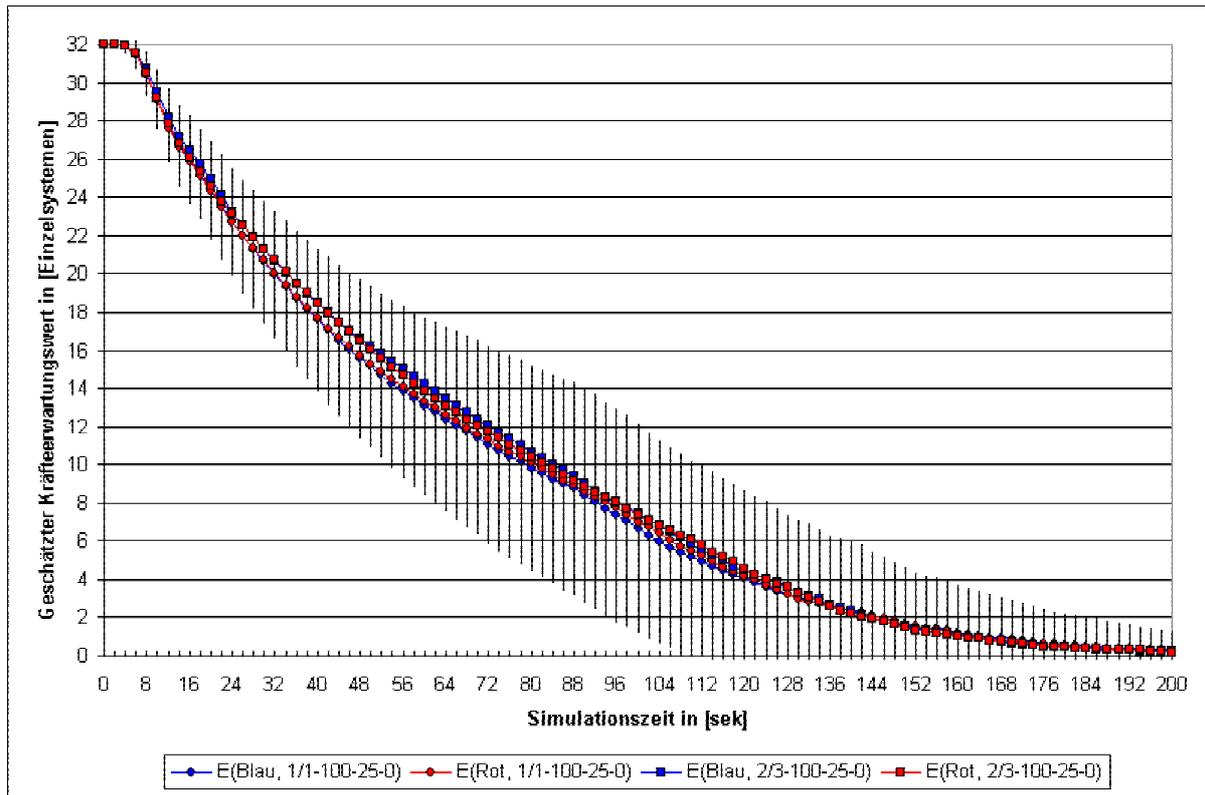


Abbildung 7.62: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Grundszenarvarianten 1/1-100-25-0 und 2/3-100-25-0)

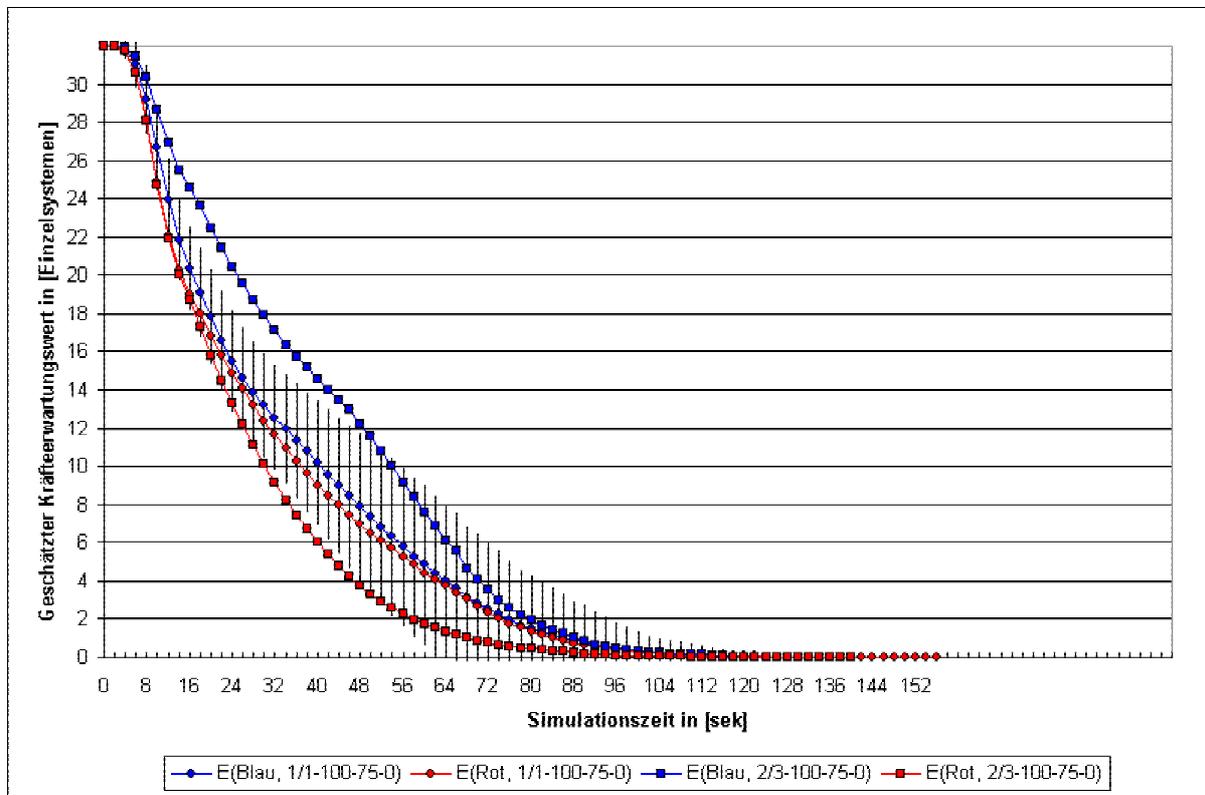


Abbildung 7.63: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Grundszenarvarianten 1/1-100-75-0 und 2/3-100-75-0)

7.3.7 Zusammenfassung zu den Ergebnissen der Versuchsreihe II

Die Ergebnisse der Versuchsreihe II lassen erkennen, dass bei aggregierter Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips die Verwendung asymmetrischer Mächtigkeiten grundsätzlich zu einer Verschiebung der *relativen Gewinnhäufigkeiten* zu Gunsten der schwächer aggregierten Partei Blau führt. Die Abweichungen zwischen den festgestellten Gewinnhäufigkeiten der (asymmetrisch) aggregierten Abbildung und denen der nicht aggregierten Abbildung nehmen mit steigendem Unterschied der verwendeten Mächtigkeiten zu und müssen aufgrund ihrer Größe als signifikant bewertet werden. Es besteht damit zwischen aggregierter und nicht aggregierter Abbildung keine starke Konsistenz im Sinne der verwendeten Definition.

Eine Ausnahme davon bilden die Grundzenarvarianten der Variantengruppen 1/2-100-y-0 und 1/3-100-y-0, bei denen das Auftreten des „*Feuerschwamm*“-Effektes²⁷⁹ einen Anstieg der relativen Gewinnhäufigkeit der stärker aggregierten Partei Rot zur Folge hat. Auch dieser Anstieg muss aufgrund seiner Größe als signifikant bewertet werden und verletzt damit das Konsistenzkriterium.

Die übrigen Bewertungsgrößen *Endstärke der siegreichen Partei*, *Gefechtsdauer* sowie *Kräfteverlauf der Parteien über der Simulationszeit* weisen ebenfalls entsprechende Abweichungen gegenüber den Ergebnissen der nicht aggregierten Abbildung auf. Diese Abweichungen würden bei geringen Unterschieden zwischen den Aggregationsstufen der Parteien Blau und Rot nicht grundsätzlich zu einer Ablehnung der Konsistenzhypothese führen, da sie teilweise unterhalb der gewählten oberen Schranke liegen. Mit steigendem Unterschied zwischen den Aggregationsstufen nehmen jedoch auch diese Abweichungen zu und sind dann ebenfalls im Sinne der Konsistenzbewertung signifikant.

Die gewonnenen Ergebnisse der Versuchsreihe II stellen keine grundsätzliche Kritik am Leitschützenprinzip dar. Sie sind aber geeignet, Grenzen in der möglichen Anwendung des Ansatzes aufzuzeigen und verdeutlichen die bereits theoretisch begründete Notwendigkeit zur Verwendung vergleichbarer Mächtigkeiten für die Abbildung aggregierter Gefechts-elemente, bei denen davon auszugehen ist, dass sie im späteren Gefecht gegeneinander eingesetzt werden.²⁸⁰

Auch bei anfänglich vergleichbaren Mächtigkeiten kann es offensichtlich durch Abnutzung im Verlauf eines Gefechts dazu kommen, dass aggregierte Gefechts-elemente mit unterschiedlicher Mächtigkeit aufeinandertreffen und somit die beschriebenen Abweichungen auftreten. Die Ergebnisse der Versuchsreihe II zeigen, dass dies nur dann im Sinne der Abbildungsgüte problematisch ist, wenn es sich um deutlich unterschiedliche Mächtigkeiten handelt. Bei einer Beschränkung der anfänglichen Mächtigkeiten der aggregierten Gefechts-elemente auf maximal Trupp- bzw. Gruppenstärke für Infanteristen bzw. Zugstärke für Gefechtsfahrzeuge können die – für signifikante Abweichungen notwendigen – erheblichen Unterschiede im Verlauf eines Gefechts praktisch nicht auftreten.

Eine Ausnahme von dieser Aussage kann die Zuführung frischer Kräfte durch eine der beiden Parteien – z.B. in Form einer zweiten Staffel des Angreifers – darstellen, wenn diese auf bereits stark abgenutzte aggregierte Gefechts-elemente der feindlichen Partei treffen.

Auf einen solchen Fall könnte zum Einen durch eine dynamische Anpassung der Gewichtungsfaktoren der Zielauswahlvorschrift reagiert werden, indem dem Faktor Mächtigkeit für

²⁷⁹ vgl. Kapitel 7.3.4.3, S. 212

²⁸⁰ vgl. Kapitel 5.3.2, S. 122f

die Zielauswahl durch die aggregierten Gefechtselemente großer Mächtigkeit die höchste Priorität zugewiesen würde. Dies könnte das Verschwenden von Feuerkraft auf feindliche Gefechtselemente kleiner Mächtigkeit minimieren. Da diese Verschwendung von Feuerkraft durch aggregierte Gefechtselemente großer Mächtigkeit auf Gefechtselemente kleiner Mächtigkeit ursächlich für die beschriebenen Abweichungen zwischen den Ergebnissen der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung ist, könnte dadurch unter Umständen eine konsistente aggregierte Abbildung erreicht werden. Eine hohe Priorisierung der Mächtigkeit im Rahmen der Zielauswahlvorschrift ist jedoch problematisch, da sie das Auftreten des „*Feuerschwamm*“-Effektes²⁸¹ begünstigt und damit ihrerseits signifikante Abweichungen zur Folge haben kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung des beschriebenen Problems könnte darin bestehen, den Einzelsystemen eines aggregierten Gefechtselementes im Rahmen eines Abnutzungszyklus die zeitparallele Bekämpfung verschiedener aggregierter Gefechtselemente zu ermöglichen. Durch solche Parallelbekämpfungen wäre es Gefechtselementen großer Mächtigkeit möglich, die Feuerkraft ihrer Einzelsysteme auf eine entsprechende Anzahl an Einzelsystemen in mehreren feindlichen Gefechtselementen zu verteilen und somit die Verschwendung von Feuerkraft ebenfalls zu vermindern. Um den durch das fiktive Leitschützelement vorgegebenen Zeittakt weiterhin nutzen zu können, wäre es bei dieser Vorgehensweise jedoch notwendig, die parallelen Bekämpfungsvorgänge der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes durch die Vorgabe einheitlicher Anfangs- und Endzeiten für ihre Abnutzungsprozesse zeitlich zu synchronisieren.

Die Möglichkeit zur zeitparallelen Bekämpfung mehrerer aggregierter Gefechtselemente durch ein einzelnes Gefechtselement würde damit eine deutliche Veränderung des ursprünglichen Ansatzes darstellen und hätte offensichtlich – je nach Modellierung – einen zusätzlichen Koordinierungsaufwand innerhalb der aggregierten Gefechtselemente zur Folge. Dieser Koordinierungsaufwand dürfte jedoch relativ gering und mit einfachen Mitteln – z.B. durch die Verwendung mittlerer Geschossflugzeiten – gut lösbar sein.

²⁸¹ vgl. Kapitel 7.3.4.3, S. 212ff

7.4 Versuchsreihe III - Untersuchungen zum Problemfeld des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen

7.4.1 Beschreibung des verwendeten Szenars und der Versuchsdurchführung

Die abschließende Versuchsreihe III untersucht die Auswirkungen des bereits theoretisch diskutierten Problems des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen (im aggregierten Fall)²⁸² und der damit gegebenenfalls verbundenen Über- bzw. Unterbewertung von Sichtmöglichkeiten auf die Abbildungsgüte des Leitschützenprinzips.

Als Grundszenar wird die bereits im Rahmen der grundlegenden Untersuchungen²⁸³ verwendete symmetrische Duellsituation mit pro Partei jeweils 32 homogenen Einzelsystemen des Typs „Schütze“ (vgl. Abbildung 7.2) gewählt.

Wie im Rahmen der allgemeinen Diskussion der Problemfelder und Grenzen des Leitschützenprinzips bereits angesprochen, ist neben der gewählten *Zusammensetzung der aggregierten Gefechts Elemente* besonders die *Beschaffenheit des Geländes* ausschlaggebend für das Auftreten des Problems des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen. Der bisher vorgestellte Zielaufklärungsprozess des Modells SAMBA würde eine systematische Untersuchung der Auswirkungen dieser beiden Faktoren nur durch die Betrachtung einer Vielzahl unterschiedlicher Gelände bzw. Dislozierungen der abgebildeten Kräfte erlauben. Da eine solche Vorgehensweise überaus vorbereitungs- und zeitintensiv wäre, werden im Folgenden zusätzlich zu den bereits bekannten Kenngrößen

- eine *entfernungsabhängige Sichtkontaktwahrscheinlichkeit* sowie
- eine davon unabhängige *Sichtbereichsgruppengröße*

als neue variable Größen eingeführt.

Die *entfernungsabhängige Sichtkontaktwahrscheinlichkeit* beschreibt für ein gegebenes Gelände die Wahrscheinlichkeit, mit welcher zwischen zwei Koordinatenpunkten mit der Distanz d eine Sichtverbindung besteht.²⁸⁴ Sie stellt somit ein mögliches Maß für die vorwiegend aus Bewuchs und Welligkeit resultierende Geländerauigkeit dar.

Die Einführung dieser Größe ist eine grundsätzliche Änderung der ursprünglichen Modellierung des Zielaufklärungsprozesses in SAMBA.²⁸⁵ In einem ersten Schritt wird dort die Menge aller feindlichen Einzelsysteme (im nicht aggregierten Fall) bzw. Gefechts Elemente (im aggregierten Fall) bestimmt, zu denen ein aufklärendes Verursacherelement eine Sichtverbindung besitzt. Auf die bisher dazu verwendete Form der Sichtlinienbestimmung durch Geländeschritte wird nun zu Gunsten eines einfachen Zufallsprozesses verzichtet. Mit Hilfe dieses Zufallsprozesses wird vor Beginn eines Simulationslaufes anhand der vorgegebenen entfer-

²⁸² vgl. Kapitel 5.3.3, S. 124ff

²⁸³ vgl. Kapitel 7.2.1, S. 162ff

²⁸⁴ Die Beschreibung einer exemplarischen Vorgehensweise zur Bestimmung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten sowie eine Diskussion ihrer Interpretation in der militärischen Realität findet sich in Anhang C, S.259ff

²⁸⁵ vgl. Kapitel 6.1.4.2, S. 133ff

nungsabhängigen Sichtkontaktwahrscheinlichkeit bestimmt, zwischen welchen Gefechtselementen der Parteien Blau und Rot eine Sichtverbindung besteht.²⁸⁶

Auch im Rahmen dieser modifizierten Modellierung des Zielaufklärungsprozesses ist es notwendig, Abhängigkeiten zwischen den Sichtbereichen individueller Einzelsysteme einer Partei zu berücksichtigen, welche bei einer geringen räumlichen Distanz im nicht aggregierten Fall auftreten. Zu diesem Zweck wird als zweite neue Kenngröße die **Sichtbereichsgruppengröße** eingeführt. Sie beschreibt die Anzahl an Einzelsystemen, bei denen im nicht aggregierten Fall vereinfacht von einem – in der gegebenen Abbildungsgenauigkeit – identischen Sichtbereich ausgegangen werden kann. Im Rahmen der modifizierten Sichtlinienbestimmung legt diese Sichtbereichsgruppengröße die Anzahl an individuellen Geländeschnitten fest, welche mit Hilfe der Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten simuliert werden müssen. Anhand des gegebenen Grundsenars soll das folgende Beispiel die Auswirkung der Sichtbereichsgruppengröße verdeutlichen:

Bei einer Sichtbereichsgruppengröße von 1 [Einzelsystem] würde das modifizierte Modell alle 1024 unterscheidbaren Kombinationen²⁸⁷ der abgebildeten blauen und roten Einzelsysteme auf Vorliegen einer Sichtverbindung prüfen. Die 1024 Überprüfungen würden jeweils individuell in Form eines einfachen Zufallsprozesses mit Hilfe der entsprechenden Sichtkontaktwahrscheinlichkeit erfolgen.

Bei einer Sichtbereichsgruppengröße von 2 [Einzelsystemen] würde das modifizierte Modell dagegen Gruppen aus jeweils 2 Einzelsystemen zusammenfassen und nur die 256 unterscheidbaren Kombinationen zwischen den jeweils resultierenden 16 Gruppen der Parteien Blau und Rot auf Vorliegen einer Sichtverbindung prüfen. Jede der 256 Überprüfungen würde wiederum in Form eines einfachen Zufallsprozesses mit Hilfe der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit erfolgen. Ergibt der jeweilige Zufallsprozess für zwei Gruppen der Parteien Blau und Rot das Vorhandensein bzw. nicht Vorhandensein einer Sichtverbindung zwischen ihnen, so gilt dies für alle möglichen Kombinationen der in ihnen – zum Zwecke der Sichtlinienüberprüfung – zusammengefassten Einzelsysteme.

Das Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die im Rahmen der theoretischen Diskussion geäußerte Vermutung zu untersuchen, dass das Problem des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen neben der Geländerauigkeit vor allem auch von der räumlichen Nähe der Einzelsysteme abhängt, welche in aggregierten Gefechtselementen zusammengefasst werden.²⁸⁸

Werden bei der aggregierten Abbildung in Gefechtselementen jeweils nur solche Einzelsysteme zusammengefasst, welche in einer engeren räumlichen Umgebung disloziert sind und deshalb über einen weitgehend einheitlichen Sichtbereich verfügen, wie dies zum Beispiel bei Infanterietrupps oder auch -gruppen in der Regel der Fall ist, wäre demnach mit keinen wesentlichen Verfälschungen der Abbildungsgüte zu rechnen.

²⁸⁶ Alternativ könnte der beschriebene Zufallsprozess auch zu Beginn jedes simulierten Aufklärungsprozesses durchgeführt werden, so dass innerhalb eines Simulationslaufes die Sichtverbindungen zwischen den feindlichen Gefechtselementen wechseln. Da Gefechtselemente jedoch grundsätzlich nicht zum gleichen Simulationszeitpunkt Aufklärungsprozesse durchführen, könnte diese Vorgehensweise zu einer inkonsistenten Situation führen, in welcher feindliche Gefechtselemente gleichzeitig divergierende Informationen über das Vorliegen einer Sichtverbindung zwischen ihnen besitzen. Im Extremfall könnte dies dazu führen, dass ein Gefechtselement ein anderes bekämpfen kann, ohne dass dies ihn zu sehen und somit zu reagieren vermag.

²⁸⁷ Die Zahl von 1024 (32x32) unterscheidbaren Kombinationen ergibt sich bei jeweils 32 blauen bzw. roten Einzelsystemen aus der Tatsache, dass im Modell eine Sichtverbindung zwischen zwei Einzelsystemen stets in beiden Richtungen existiert bzw. nicht existiert. Der Fall, dass ein gegebenes blaues Einzelsystem eine Sichtverbindung zu einem roten Einzelsystem besitzt, dieses jedoch umgekehrt nicht, ist ausgeschlossen.

²⁸⁸ vgl. Kapitel 5.3.3, S. 124ff.

Im Rahmen der ursprünglichen Modellierung des Zielaufklärungsprozesses könnte diese Annahme alternativ durch eine systematische Dislozierung der Einzelsysteme geprüft werden. Zu diesem Zweck müsste bereits bei der Dislozierung der Einzelsysteme darauf geachtet werden, dass die sich aus den Geländebeziehungen ergebenden Sichtbereiche für Gruppen von Einzelsystemen (praktisch) übereinstimmen. Anschließend könnten in zwei unterschiedlichen aggregierten Abbildungen des Gefechts zum Einen Einzelsysteme mit identischen Sichtbereichen sowie zum Anderen Einzelsysteme mit unterschiedlichen Sichtbereichen in aggregierten Gefechtselementen zusammengefasst werden. Ein Vergleich der jeweils erzielten Abbildungsgüte würde dann die gewünschte Untersuchung der oben genannten Vermutung ermöglichen.

Für die modifizierte Modellierung des Zielaufklärungsprozesses mit Hilfe der entfernungsabhängigen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten besitzen die jeweiligen Geländebeziehungen und damit die gewählte Dislozierung der Einzelsysteme keinen direkten Einfluss auf die Bestimmung der individuellen Sichtbereiche. Der beschriebene Ansatz zur Überprüfung der gemachten Annahme kann damit nicht genutzt werden. An die Stelle einer impliziten Bestimmung von Einzelsystemgruppen mit identischen Sichtbereichen durch eine entsprechende Dislozierung tritt deshalb die beschriebene explizite Bestimmung durch Angabe der gewünschten Sichtbereichsgruppengröße.

Aus der – durch Einführung der entfernungsabhängigen Sichtkontaktwahrscheinlichkeit sowie der Sichtbereichsgruppengröße – modifizierten Modellierung des Zielaufklärungsprozesses resultiert eine Sichtverbindungsmatrix (vgl. Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3), welche für die Dauer des jeweiligen Simulationslaufes als konstant angenommen wird.

		Blau				
		<i>Schütze 1</i>	<i>Schütze 2</i>	...	<i>Schütze 31</i>	<i>Schütze 32</i>
Rot	<i>Schütze 1</i>	Ja	Nein	...	Nein	Ja
	<i>Schütze 2</i>	Ja	Ja	...	Ja	Nein
	:	:	:	:	:	:
	<i>Schütze 31</i>	Nein	Nein	...	Ja	Nein
	<i>Schütze 32</i>	Ja	Ja	...	Ja	Nein

Tabelle 7.2: Sichtverbindungsmatrix für die Parteien Blau und Rot (je 32 Gefechtselemente der Mächtigkeit 1) bei einer Sichtbereichsgruppengröße von 1

		Blau				
		Schütze 1	Schütze 2	...	Schütze 31	Schütze 32
Rot	Schütze 1	Ja	...	:	Nein	
	Schütze 2					
	:	:	:	:		
	Schütze 31	Nein	...	:	Ja	
	Schütze 32					

Tabelle 7.3: Sichtverbindungsmatrix für die Parteien Blau und Rot (je 32 Gefechtselemente der Mächtigkeit 1) bei einer Sichtbereichsgruppengröße von 2

Die Verwendung der derart modifizierten Modellierung des Zielaufklärungsprozesses ermöglicht eine Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlich schwieriger Geländetypen sowie der Zusammensetzung der aggregierten Gefechtselemente durch Variation der verwendeten Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten und Sichtbereichsgruppengrößen. Betrachtet werden dabei einerseits Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten in den Ausprägungen 10%, 30%, 50%, 70% sowie 90%. Diese werden im Rahmen einer vorgegebenen Gefechtsdistanz zwischen den Kräften der Parteien der Einfachheit halber jeweils für die gesamte Menge der dabei möglichen Entfernungen zwischen einzelnen Gefechtselementen als konstant angenommen und unterliegen innerhalb einer Szenarvariante keiner weiteren Differenzierung.²⁸⁹ Auf die Untersuchung einer Sichtkontaktwahrscheinlichkeit von 100% wird verzichtet, da diese den bereits innerhalb der Versuchsreihe I betrachteten Fall eines Geländes beschreiben würde, welches eine Sichtverbindung zwischen allen Geländepunkten erlaubt. Die Sichtbereichsgruppengröße wird gleichzeitig in den Ausprägungen 1, 2, 4 und 8 betrachtet und innerhalb einer Grundszenarvariante parteiübergreifend einheitlich gesetzt.

Für die Kenngrößen „Grad der Aggregation“ sowie „Distanz zwischen den Kräften beider Parteien“ werden die bereits im Rahmen der Versuchsreihe I verwendeten Ausprägungen genutzt. Untersucht werden wiederum 6 Aggregationsstufen, welche den Anfangsmächtigkeiten 1, 2, 4, 8, 16 und 32 eines Gefechtselementes entsprechen, sowie drei Gefechtsentfernungen von 100m, 500m und 1.000m. Die entfernungsunabhängige Treffwahrscheinlichkeit sowie der Feuerkoordinierungsgrad (im aggregierten Fall) werden innerhalb dieser Versuchsreihe mit 75% respektive 0% als konstant angenommen. Insgesamt ergeben sich somit 360 Varianten (vgl. Abbildung 7.64) des Grundszenars, mit welchen erneut jeweils 1.000 Simulationsläufe (Replikationen) durchgeführt werden.

Da im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen bei dieser Versuchsreihe aufgrund der zufälligen Bestimmung der Sichtverbindungen nicht sichergestellt ist, dass jede Replikation bis zur völligen Vernichtung einer der beiden am Gefecht beteiligten Parteien führen kann,

²⁸⁹ Eine Begründung für diese Vorgehensweise findet sich in Anhang C, S.259ff

wird als zusätzliches Abbruchkriterium eine *Endzeit*²⁹⁰ von 200sek vorgegeben. Spätestens bei Erreichen dieser Zeit durch die Simulationsuhr wird ein einzelner Simulationslauf abgebrochen. Tritt dieser Fall ein, so entscheiden die dann aktuellen Gesamtstärken der beiden Parteien darüber, wer als Sieger des Simulationslaufes gewertet wird.

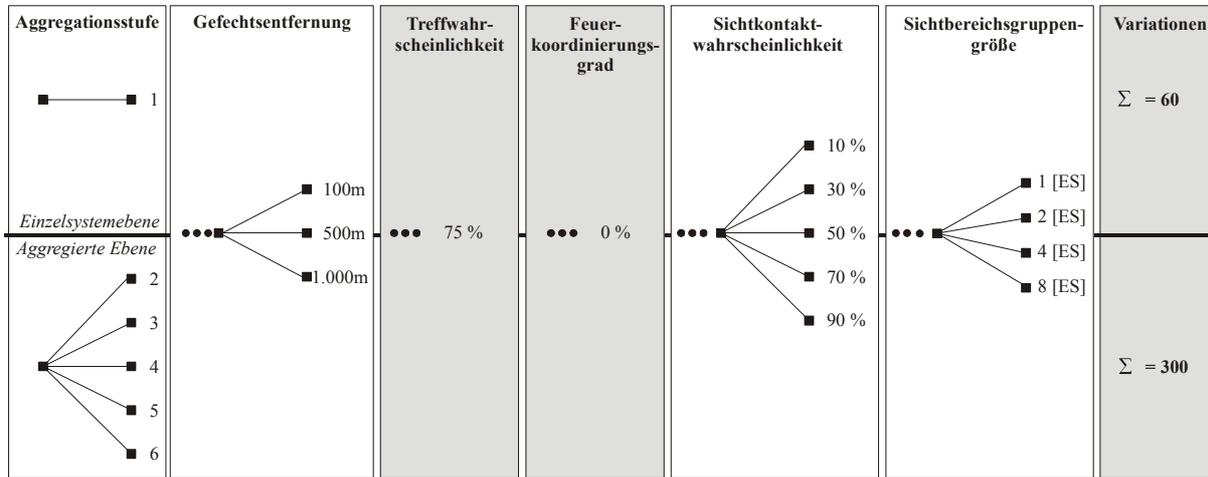


Abbildung 7.64: In Versuchsreihe III betrachtete Varianten des Grundszenars

²⁹⁰ vgl. Kapitel 6.2, S. 154

7.4.2 Bezeichnung der Grundszenarvarianten in der Versuchsreihe III

Zur Identifikation einzelner Varianten bzw. ganzer Gruppen von Varianten des Grundszenars wird im Folgenden grundsätzlich die bei Versuchsreihe I eingeführte Bezeichnungsweise²⁹¹ verwendet. Um dabei eine Unterscheidung der jeweils betrachteten Ausprägungen der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit und Sichtbereichsgruppengröße zu ermöglichen und gleichzeitig eine konsistente Bezeichnung zu gewährleisten, wird die bisherige 4-teilige Bezeichnungsweise fortgeführt und um zwei weitere Stellen ergänzt. Diese bezeichnen die jeweilige Ausprägung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit in Prozent sowie der Sichtbereichsgruppengröße in [Einzelssystemen]. Treffwahrscheinlichkeit und Feuerkoordinierungsgrad unterliegen im Rahmen dieser Versuchsreihe keiner Variation, werden zur Wahrung der Bezeichnungskonsistenz weiter angegeben. Die Bezeichnung einer Grundszenarvariante setzt sich demnach in der folgenden Reihenfolge zusammen aus:

Aggregationsstufe – Gefechtsentfernung – Treffwahrscheinlichkeit – Feuerkoordinierungsgrad – Sichtkontaktwahrscheinlichkeit – Sichtbereichsgruppengröße.

Die Bezeichnung 2-100-75-0-10-1 etwa identifiziert somit eine Variante des Grundszenars, in welcher die Aggregationsstufe die Ausprägung 2 besitzt, die Gefechtsdistanz 100m, Treffwahrscheinlichkeit und Feuerkoordinierungsgrad – wie angesprochen – 75% bzw. 0% betragen und eine Sichtkontaktwahrscheinlichkeit von 10% sowie eine Sichtbereichsgruppengröße von 1 [Einzelssystem] verwendet wird.

Die Ersetzung einer oder mehrerer der Kenngrößen innerhalb dieser Bezeichnungsweise durch Variablen dient erneut zur Ansprache der Menge aller Varianten des Grundszenars, welche über die durch die explizit angegebenen Kenngrößen bezeichneten Ausprägungen verfügen.

²⁹¹ vgl. Kapitel 7.2.2, S. 166

7.4.3 Bewertung des Rechenzeitverhaltens

Für das in Versuchsreihe I festgestellte verbesserte **Rechenzeitverhalten** der aggregierten Abbildung ist neben der geringeren Anzahl parallel zu verwaltender Ereignisse vor allem die Reduzierung der Zahl zeitintensiver Geländeschnitte zur Sichtkontaktbestimmung ursächlich.²⁹² Aufgrund der Einführung der *entfernungsabhängigen Sichtkontaktwahrscheinlichkeit* sowie der *Sichtbereichsgruppengröße*, fallen Geländeschnitte in der modifizierten Modellierung des Zielaufklärungsprozesses jedoch gänzlich weg.

Ein Vergleich des Rechenzeitverhaltens der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung würde im Rahmen der Versuchsreihe III deshalb nur eingeschränkt Sinn machen, da festgestellte Veränderungen des Rechenzeitverhaltens zu einem unbestimmten Teil auf die modifizierte Modellierung des Zielaufklärungsprozesses sowie zu einem anderen Teil weiterhin auf die Reduzierung der Anzahl parallel zu verwaltender Ereignisse zurückzuführen sind.

Eine explizite Bewertung des Rechenzeitverhaltens der modifizierten Modellierung hat darüber hinaus generell keinen Sinn, da die gewählten Modifikationen einzig zur systematischen Untersuchung des beschriebenen Problemfeldes dienen und deshalb auch nur im Rahmen der Versuchsreihe III Bestand haben.

Zusätzlich ist festzustellen, dass neben den bisher genannten Gründen auch die Einführung einer Endzeit als Abbruchkriterium gegen eine Bewertung des Rechenzeitverhaltens in Versuchsreihe III spricht. Die notwendige Einführung der Endzeit führt offensichtlich zu einer Verfälschung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der **Gefechtsdauer** und damit aus den in Kapitel 7.2.3 genannten Gründen schlussendlich auch zu einer Verfälschung der benötigten Rechenzeit pro Simulationslauf.

Im Rahmen der Versuchsreihe III wird deshalb auf eine Bewertung des Rechenzeitverhaltens verzichtet und alternativ auf die Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsreihen verwiesen.

Vor dem Hintergrund der Intention der Versuchsreihe III stellt dieser Verzicht keine Einschränkung dar, da die grundlegenden Untersuchungen der Versuchsreihe I bereits in der Lage waren, das verbesserte Rechenzeitverhalten der aggregierten Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips nachzuweisen.

²⁹² vgl. Kapitel 5.2, S. 116ff

7.4.4 Konsistenzbewertung bezüglich der Gewinnhäufigkeit

Die Ergebnisse der Versuchsreihe III lassen bei einer Variation der gewählten Kenngrößen *entfernungsabhängige Sichtkontaktwahrscheinlichkeit*, *Sichtbereichsgruppengröße*, *Gefechtsdistanz* sowie *Aggregationsstufe* keine signifikanten Veränderungen der **relativen Gewinnhäufigkeiten** der Parteien Blau und Rot erkennen.

Analog zu Versuchsreihe I war mit derartigen Veränderungen grundsätzlich auch nicht zu rechnen, da wiederum alle Variationen des Grundszenars bezüglich der Parteien Blau und Rot symmetrisch vorgenommen wurden.

Zur Absicherung dieser Aussage wurden die ermittelten Daten jeder Grundszenarvariante erneut einem χ^2 -Anpassungstest²⁹³ auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ unterzogen. Die dabei getesteten Hypothesen lauten:

H₀: Beide Parteien verfügen über die gleiche Gewinnwahrscheinlichkeit, d.h. ein einzelner Simulationslauf endet jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % mit einem Sieg von Blau bzw. Rot.

H₁: Die Parteien Blau und Rot verfügen nicht über die gleiche Gewinnwahrscheinlichkeit.

Auf dem geforderten Signifikanzniveau ergab die Durchführung des Tests für jede Variation, dass die genannte Nullhypothese nicht verworfen werden muss.

7.4.5 Konsistenzbewertung bezüglich der Gefechtsdauer

Auf eine Auswertung der erhaltenen Ergebnisse bezüglich des geschätzten Erwartungswertes sowie der geschätzten Standardabweichung der **Gefechtsdauer** wird im Rahmen der Versuchsreihe III verzichtet, da diese Bewertungsgröße durch die Einführung einer Endzeit als Abbruchkriterium offensichtlich direkt beeinflusst bzw. verfälscht wird.

²⁹³ Eine Beschreibung der Vorgehensweise beim χ^2 -Anpassungstest findet sich z.B. in [Rinne 95], S. 410f

7.4.6 Konsistenzbewertung bezüglich der Endstärke

7.4.6.1 Grundsätzliche Aussagen

Die **Endstärke der siegreichen Partei** erhält durch die Vorgabe einer Endzeit als Abbruchkriterium eine neue Bedeutung. Während im Fall der Versuchsreihe I und II ein simuliertes Gefecht grundsätzlich bis zur völligen Vernichtung einer der beiden Parteien geführt wird und somit die Endstärke der siegreichen Partei auch gleichzeitig die Gesamtzahl der nach einem Gefecht verbliebenen Kräfte beider Parteien darstellt, muss im Rahmen der Versuchsreihe III – gerade bei geringen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten – berücksichtigt werden, dass ein simuliertes Gefecht bei Erreichen der vorgegebenen Endzeit abgebrochen wird. Die Endstärke der siegreichen Partei ist dann identisch mit dem Maximum der zu diesem Zeitpunkt jeweils verbliebenen Zahl an Einzelsystemen der Parteien Blau und Rot. Eine Aussage über die Gesamtzahl der nach einem Gefecht verbleibenden Kräfte beider Parteien ist somit nur noch eingeschränkt möglich, da lediglich sichergestellt ist, dass diese Gesamtzahl maximal dem doppelten der Endstärke der siegreichen Partei entspricht.

Vor diesem Hintergrund erlaubt eine Betrachtung der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei folgende grundsätzliche Aussagen, welche in den nachfolgenden Kapiteln weiter erläutert werden:

- Bei kleinen *Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten* führt eine Erhöhung der *Aggregationsstufe* in Abhängigkeit von der jeweiligen *Sichtbereichsgruppengröße* zu einer Zunahme des geschätzten Erwartungswertes sowie der geschätzten Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei (vgl. Kapitel 7.4.6.2).
- Eine Veränderung der *Gefechtsdistanz* führt sowohl im aggregierten als auch im nicht aggregierten Fall zu keiner signifikanten Veränderung des geschätzten Erwartungswertes sowie der geschätzten Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei.

7.4.6.2 Analyse der Auswirkungen der Aggregationsstufe, der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit sowie der Sichtbereichsgruppengröße

Die gewonnenen Ergebnisse der Versuchsreihe III lassen erkennen, dass bei kleineren *Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten* von 10%, 30% bzw. 50% sowie einer geringen *Sichtbereichsgruppengröße* mit zunehmender *Aggregationsstufe* ein signifikanter Anstieg des geschätzten Erwartungswertes der Endstärke der siegreichen Partei und ebenfalls ein gleichzeitiger Anstieg der entsprechenden geschätzten Standardabweichung zu beobachten ist (vgl. Abbildung 7.65). Mit steigender Sichtkontaktwahrscheinlichkeit fällt der Anstieg sowohl des geschätzten Erwartungswertes als auch der geschätzten Standardabweichung immer geringer aus und ist bei einer Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten von 70% bzw. 90% im Sinne der Konsistenzbewertung nicht mehr signifikant (vgl. Abbildung 7.66).

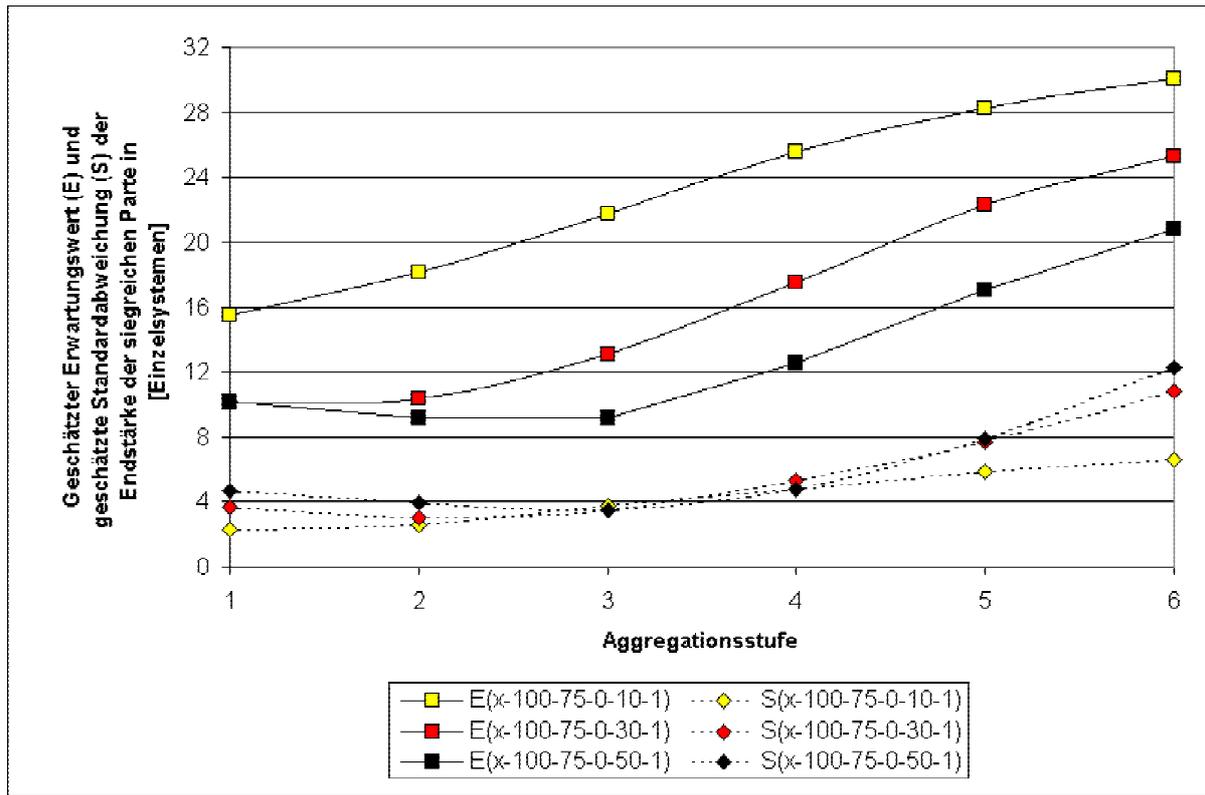


Abbildung 7.65: Geschätzter Erwartungswert und geschätzte Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei (Variantengruppen x-100-75-0-10-1, x-100-75-0-30-1 und x-100-75-0-50-1)

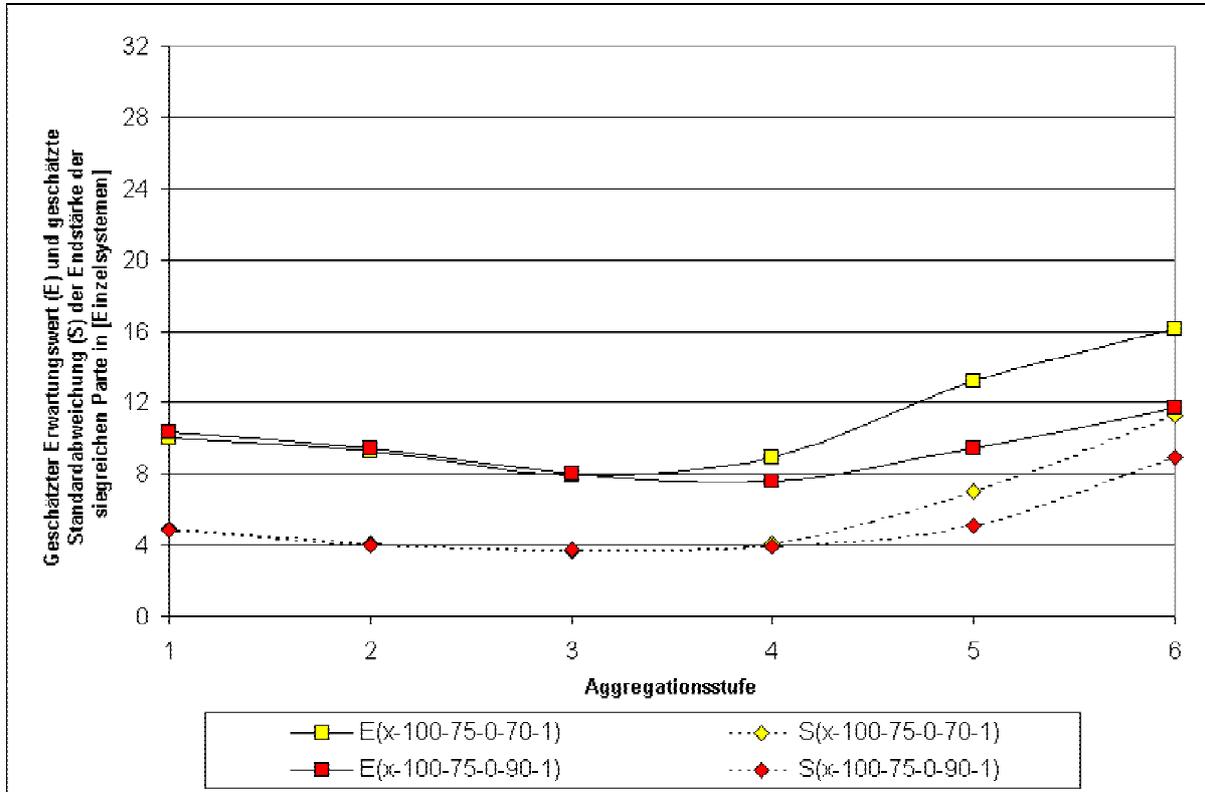


Abbildung 7.66: Geschätzter Erwartungswert und geschätzte Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei (Variantengruppen x-100-75-0-70-1 und x-100-75-0-90-1)

Mit steigender *Sichtbereichsgruppengröße* steigt gleichzeitig das Ausgangsniveau des geschätzten Erwartungswertes sowie der geschätzten Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei auf Aggregationsstufe 1 an (vgl. Abbildung 7.67). Diese Werte bleiben bei einer Erhöhung der Aggregationsstufe jedoch solange praktisch konstant bis die der gewählten Aggregationsstufe entsprechende Anfangsmächtigkeit der aggregierten Gefechts-elemente die jeweilige Sichtbereichsgruppengröße überschreitet. Die dann mit weiter steigender Aggregationsstufe zu beobachtende Zunahme der geschätzten Erwartungswerte und Standardabweichungen entspricht in ihrem absoluten Maß dem bei geringer Sichtbereichsgruppengröße beobachteten. Auf Aggregationsstufe 6 werden damit unabhängig von der jeweiligen Sichtbereichsgruppengröße für eine gegebene Sichtkontaktwahrscheinlichkeit stets die gleichen Werte erreicht (vgl. Abbildung 7.67).

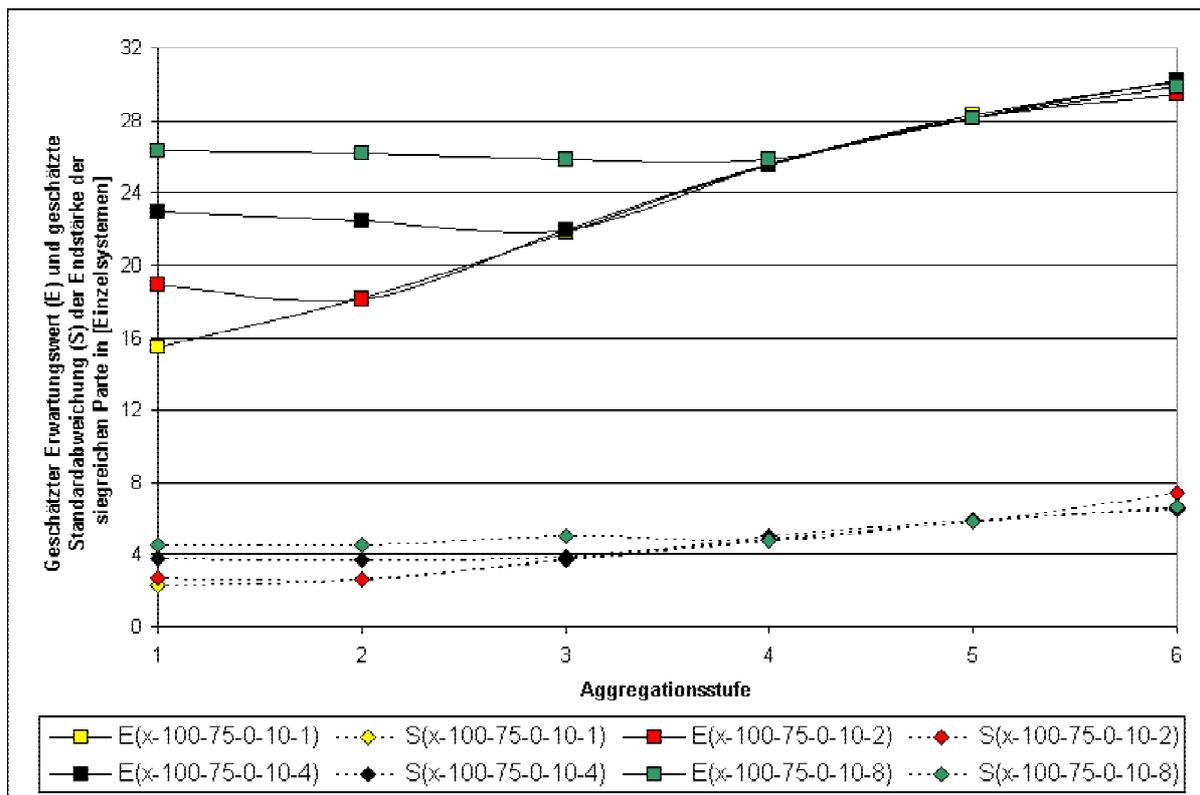


Abbildung 7.67: Geschätzter Erwartungswert und geschätzte Standardabweichung der Endstärke der siegreichen Partei (Variantengruppen x-100-75-0-10-y)

Notwendig für eine wechselseitige Abnutzung mit Flachfeuer ist im Modell SAMBA das Vorliegen einer Sichtverbindung zwischen aggregierten Gefechts-elementen der Parteien Blau und Rot. Die Anzahl der im Rahmen von Versuchsreihe III vor Beginn eines simulierten Gefechts ermittelten Sichtverbindungen erlaubt damit die Berechnung einer oberen Grenze für die im Verlauf der jeweiligen Replikation maximal mögliche Abnutzung beider Parteien. Um die beobachteten Abhängigkeiten der Endstärke der siegreichen Partei von den Kenngrößen *Aggregation* und *Sichtkontaktwahrscheinlichkeit* zu erklären, ist es sinnvoll, gemäß Formel (7.1) den Erwartungswert der Gesamtzahl an Einzelsystemen der Partei Rot zu berechnen, welche zu mindestens einem aggregierten Gefechts-element der gegnerischen Partei Blau eine Sichtverbindung besitzen.²⁹⁴

²⁹⁴ Aufgrund der gegebenen Symmetrie des Grundszenars der Versuchsreihe III handelt es sich dabei stets auch um den Erwartungswert der Einzelsysteme der Partei Blau, welche zu mindestens einem aggregierten Gefechts-element der Partei Rot eine Sichtverbindung besitzen.

$$EW_{LOS}(p(LOS), b_1, \bar{N}_B, \bar{N}_R) = \left(\frac{\bar{N}_R}{b_1}\right) \cdot \sum_{c=0}^{\bar{N}_R} c \cdot \binom{\bar{N}_R}{c} \cdot [1 - (1 - p(LOS))^{\bar{N}_B}]^c \cdot [1 - p(LOS)]^{\bar{N}_B} \cdot [1 - p(LOS)]^{(\bar{N}_R - c)} \quad (7.1)$$

wobei

- $p(LOS)$ = Sichtkontaktwahrscheinlichkeit
- b_1 = Anzahl Einzelsysteme des Typs 1 („Schütze“) der Partei Rot
- \bar{N}_B = Gesamtzahl aggregierter Gefechtselemente der Partei Blau
- \bar{N}_R = Gesamtzahl aggregierter Gefechtselemente der Partei Rot

Berechnet man nun mit Hilfe von (7.1) für die betrachteten Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten den Verlauf des gesuchten Erwartungswertes bei einer Erhöhung der Aggregationsstufe (vgl. Abbildung 7.68), so lässt sich feststellen, dass eine solche Erhöhung grundsätzlich zu einer Verringerung des errechneten Erwartungswertes führt. Mit zunehmender Sichtkontaktwahrscheinlichkeit beginnt diese Verringerung erst auf höheren Aggregationsstufen und fällt betragsmäßig kleiner aus, als dies bei geringeren Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten der Fall ist.

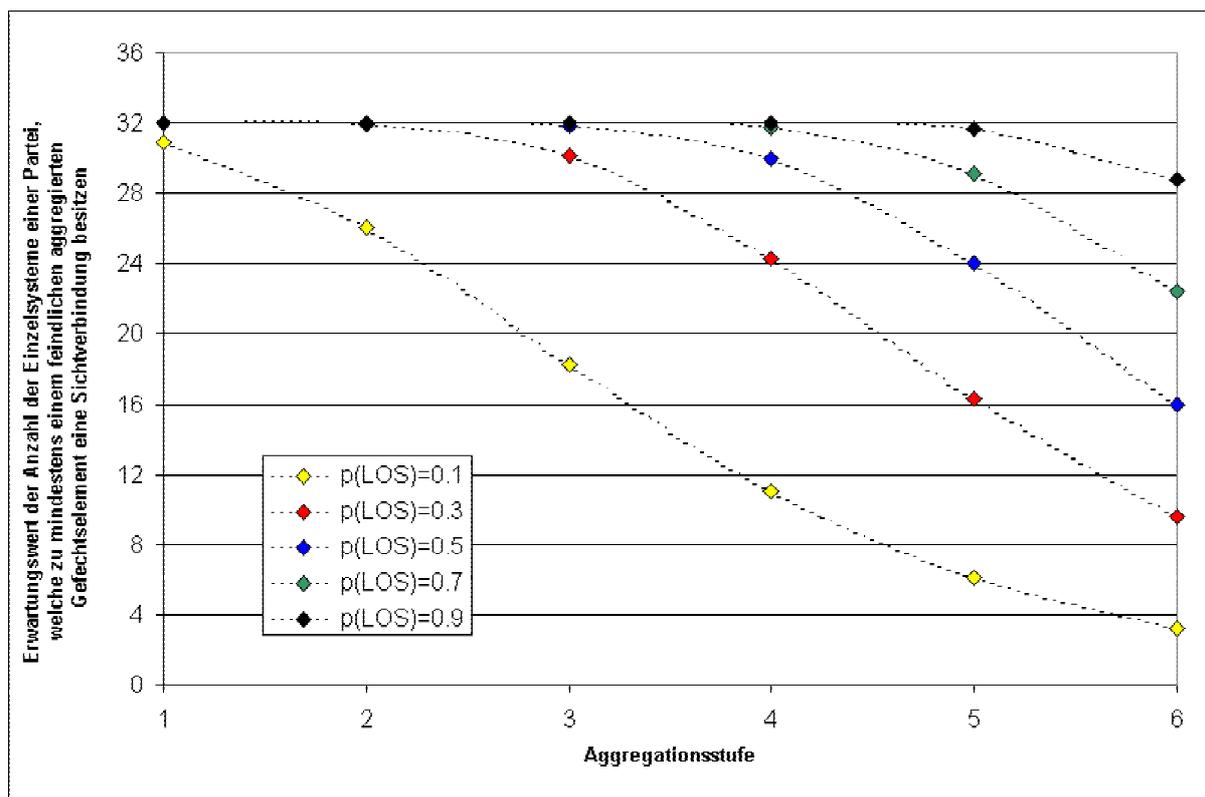


Abbildung 7.68: Verlauf des Erwartungswertes EW_{LOS} (in Abhängigkeit von der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit $p(LOS)$ und der Aggregationsstufe)

Es wurde eingangs bereits festgestellt, dass die Endstärke der siegreichen Partei im Rahmen der Versuchsreihe III – gerade bei kleinen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten – grundsätzlich nur als Maximum der beiden Gesamtstärken der Parteien Blau und Rot nach Erreichen eines der beiden Abbruchkriterien interpretiert werden kann. Der ermittelte Erwartungswert stellt damit eine obere Grenze für den Erwartungswert der maximalen Abnutzung dar, welcher die jeweilige Partei unterliegen kann. Mit Hilfe von Formel (7.2) lässt sich deshalb eine untere Grenze für den Erwartungswert der Endstärke der siegreichen Partei ermitteln.

$$uG(p(LOS), b_1, \bar{N}_B, \bar{N}_R) = b_1 - EW_{LOS}(p(LOS), b_1, \bar{N}_B, \bar{N}_R) \quad (7.2)$$

Ein Vergleich des geschätzten Erwartungswertes der Endstärke der siegreichen Partei am Beispiel der Grundzenarvariante x-100-75-0-10-1 mit der gemäß (7.2) analytisch ermittelten unteren Grenze für diesen Wert macht deutlich, dass die beobachtete Zunahme des geschätzten Erwartungswertes mit steigender Aggregationsstufe durch den Verlauf der unteren Grenze vorgegeben wird.

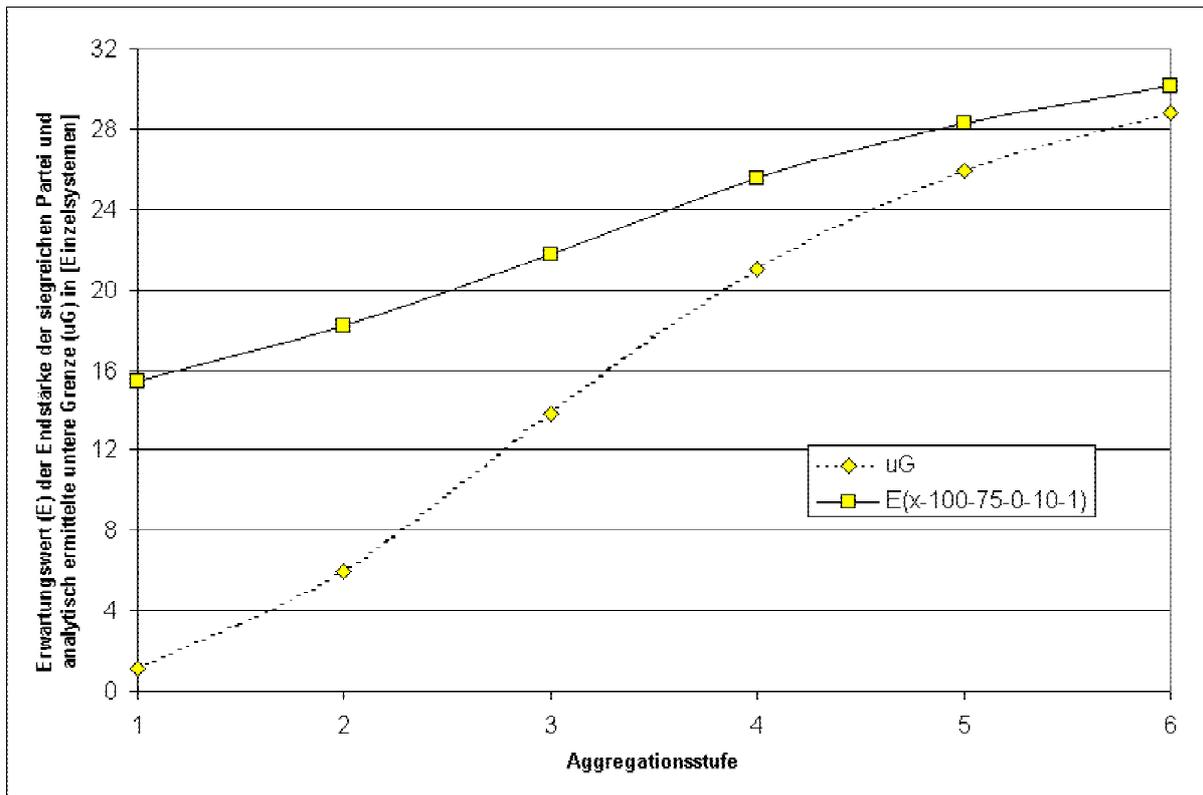


Abbildung 7.69: Erwartungswert der Endstärke der siegreichen Partei (Grundsszenarvariante x-100-75-0-10-1) sowie analytisch bestimmte untere Grenze für diesen Wert

Die dargestellten Überlegungen zeigen, dass der zu beobachtende Anstieg der Endstärke der siegreichen Partei auf die Verringerung der Anzahl an Sichtverbindungen zurückzuführen ist, welche mit zunehmender *Aggregationsstufe* zwischen den aggregierten Gefechtselementen beider Parteien notwendig sind. Gerade bei kleinen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten wirkt sich diese Verringerung der Anzahl an Sichtlinienüberprüfungen immer deutlicher auf den Verlauf des Gefechts und damit auf die betrachtete Bewertungsgröße aus, da nun jede einzelne dieser Überprüfungen über die Sichtmöglichkeiten einer steigenden Zahl an Einzelsystemen entscheidet.

Es wird damit deutlich, dass eine Erhöhung der Sichtbereichsgruppengröße im Rahmen der modifizierten Modellierung analog zu einer Erhöhung der Aggregationsstufe dazu führt, dass jede einzelne Sichtlinienüberprüfung Einfluss auf die Sicht- und Handlungsmöglichkeiten einer steigenden Anzahl an Einzelsystemen hat. Die bei einer Erhöhung der Sichtbereichsgruppengröße beobachteten Auswirkungen resultieren somit aus den bei einer Steigerung der Aggregationsstufe bereits beschriebenen Zusammenhängen.

7.4.6.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen den geschätzten Erwartungswerten und Standardabweichungen der Endstärke der siegreichen Partei und den gewählten Variationen der Aggregationsstufe, Sichtkontaktwahrscheinlichkeit und Sichtbereichsgruppengröße.

Die beobachteten Abhängigkeiten – gerade bei kleinen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten – der geschätzten Werte von der Aggregationsstufe lassen erkennen, dass das vermutete Problem des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmung (im aggregierten Fall) zu signifikanten Abweichungen der Ergebnisse der aggregierten Abbildung von den Ergebnissen der nicht aggregierten Abbildung führen kann.

Die ebenfalls zu beobachtende Abhängigkeit der Endstärke der siegreichen Partei von der jeweils gewählten Sichtbereichsgruppengröße lässt jedoch den grundsätzlichen Schluss zu, dass bei nicht modifizierter Modellierung des Zielaufklärungsprozesses sowie geeigneter Bildung der aggregierten Gefechtselemente die durch die Aggregation auftretenden Abweichungen auf ein nicht signifikantes Maß reduziert werden können.

Werden bei aggregierter Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips nur Einzelsysteme zu aggregierten Gefechtselementen zusammengefasst, welche in einem engen räumlichen Umfeld disloziert sind, so ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass diese im Modell über weitestgehend identische Sichtbereiche verfügen.²⁹⁵ Dieser Tatsache würde in der modifizierten Modellierung die Wahl einer Sichtbereichsgruppengröße entsprechen, welche mit der gewählten Mächtigkeit der gebildeten aggregierten Gefechtselemente identisch ist. Die Ergebnisse der Versuchsreihe III zeigen jedoch für diesen Fall deutlich, dass eine signifikante Abweichung – selbst bei geringer Sichtkontaktwahrscheinlichkeit – erst dann auftritt, wenn die gewählte Aggregationsstufe die jeweilige Sichtbereichsgruppengröße überschreitet, d.h. wenn Einzelsysteme mit potentiell stark divergierenden Sichtbereichen in aggregierten Gefechtselementen zusammengefasst werden.

²⁹⁵ Die Definition eines „engen räumlichen Umfeldes“ hängt selbstverständlich von der gewählten Auflösung der Geländedarstellung sowie der allgemeinen Beschaffenheit des abgebildeten Geländes ab. Bei einer für hochauflösende Gefechtssimulationssysteme derzeit als sinnvoll zu bewertenden Geländeauflösung von 25m, wie sie in SAMBA Verwendung findet, sollte dies für die Einzelsysteme (Schützen) eines Infanterietrupps / einer Infanteriegruppe jedoch selbst in schwierigem Gelände (Wald) zumeist der Fall sein. Dies liegt vor allem auch in der Tatsache begründet, dass die Einzelsysteme eines solchen Trupps / einer solchen Gruppe eine räumliche Nähe einhalten müssen, um dadurch die Wirksamkeit und Führbarkeit der Teileinheit zu sichern.

7.4.7 Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs

Eine Betrachtung der Ergebnisse der Versuchsreihe III bezüglich des Verlaufes der geschätzten Erwartungswerte und zugehörigen Standardabweichungen der **Gesamtstärken** der Parteien über der Simulationszeit²⁹⁶ liefert keine – gegenüber den vorangegangenen Betrachtungen dieser Versuchsreihe – grundsätzlich neuen Erkenntnisse. Der festgestellte Verlauf der Kräfteerwartungswerte der Parteien in den betrachteten Grundszenarvarianten ist aber geeignet, die gerade im Rahmen der vorangegangenen Konsistenzbewertung der *Endstärke der siegreichen Partei* gewonnenen Erkenntnisse zu untermauern.

Bei allen betrachteten Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten führt eine fortgesetzte Erhöhung der Aggregationsstufe zu einer Abweichung zwischen den geschätzten Kräfteerwartungswerten der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung (vgl. Abbildung 7.70 und Abbildung 7.71). Diese Abweichung nimmt ab einer gewissen Aggregationsstufe ein signifikantes Ausmaß an. Die jeweilige Aggregationsstufe ab welcher diese Abweichung für die Konsistenzbewertung signifikant wird, ist dabei zum Einen von der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit sowie zum Anderen von der gewählten Sichtbereichsgruppengröße abhängig. Sowohl eine Erhöhung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit als auch eine Erhöhung der Sichtbereichsgruppengröße führen in allen Grundszenarvarianten der Versuchsreihe III stets dazu, dass die zu beobachtenden Abweichungen geringer ausfallen (vgl. Abbildung 7.70 und Abbildung 7.72).

Gerade bei kleinen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten von 10%, 30% oder 50% ist deutlich zu erkennen, dass das simulierte Gefecht in der Regel nicht zur völligen Vernichtung einer der beiden Parteien führt (vgl. Abbildung 7.70 und Abbildung 7.72). Nach einer anfänglichen Phase der Abnutzung beider Parteien verlaufen die Kräfteerwartungswerte bis zum Erreichen der vorgegebenen Endzeit auf einem konstanten Niveau. Die Erhöhung der Aggregationsstufe verkürzt bei sonst gleich bleibenden Kenngrößen die anfängliche Abnutzungsphase und erhöht dadurch das konstante Endniveau. Eine Erhöhung der Sichtbereichsgruppengröße führt bei kleinen Sichtkontaktwahrscheinlichkeit ebenfalls zu einer Verkürzung der anfänglichen Abnutzungsphase und damit zu einer Erhöhung des konstanten Endniveaus. Im Gegensatz zu der Erhöhung der Aggregationsstufe tritt dieser Effekt bei einer Erhöhung der Sichtbereichsgruppengröße jedoch bereits im nicht aggregierten Fall auf.²⁹⁷

Bei großen Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten von 70% oder 90% ist für den nicht aggregierten Fall ein Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte festzustellen, welcher praktisch den Ergebnissen der Versuchsreihe I entspricht. Auf hohen Aggregationsstufen ist jedoch zu beobachten, dass zwar zu Beginn eines simulierten Gefechts der geschätzte Verlauf der Kräfteerwartungswerte im aggregierten Fall demjenigen im nicht aggregierten Fall entspricht. Ab einer gewissen Simulationszeit weicht der geschätzte Kräfteerwartungswert im aggregierten Fall jedoch ab und verläuft erneut bis zu dem endzeitbedingten Abbruch der jeweiligen Replikation auf einem konstanten Niveau. Es findet somit keine weitere Abnutzung statt.

Die Ursache für den beschriebenen Verlauf der Kräfteerwartungswerte und seine Abhängigkeit von der gewählten Aggregationsstufe, der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit sowie der jeweiligen Sichtbereichsgruppengröße liegt erneut in der jeweils notwendigen Anzahl an Sichtlinienüberprüfungen. Eine zunehmende Aggregationsstufe bzw. kleine Sichtkontaktwahr-

²⁹⁶ Im Folgenden wiederum kurz als Kräfteerwartungswert bzw. Kräftestandardabweichung bezeichnet.

²⁹⁷ Dies entspricht der bereits festgestellten Erhöhung der *Endstärke der siegreichen Partei* bei einer Erhöhung der Aggregationsstufe sowie der dort beschriebenen Abhängigkeit dieser Maßgröße von der gewählten Sichtbereichsgruppengröße (vgl. Kapitel 7.4.6, S. 232ff).

scheinlichkeit führt in der bereits beschriebenen Art und Weise²⁹⁸ zu einer Reduzierung des Erwartungswertes der Anzahl an Einzelsystemen, zu welchen mindestens eines der aggregierten Gefechts-elemente einer Partei eine Sichtverbindung besitzt. Eine solche Reduzierung bedeutet notwendigerweise auch eine Verringerung der Zahl während eines Gefechts potentiell möglicher Abnutzungsprozesse, durch welche schlussendlich der beobachtete Verlauf der Kräfteerwartungswerte zustande kommt.

Die Konsistenzbewertung bezüglich des Kräfteverlaufs lässt somit den generellen Schluss zu, dass das theoretisch beschriebene Problem des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen (im aggregierten Fall) zu einer signifikanten Abweichung der Ergebnisse der aggregierten Abbildung von denen der nicht aggregierten Abbildung führen kann und damit keine starke Konsistenz nach [Davis, Bigelow 98] gegeben ist. Ebenfalls festgestellt werden kann jedoch, dass eine adäquate Bildung der aggregierten Gefechts-elemente, welche die jeweiligen Gelände-verhältnisse sowie die ursprüngliche Dislozierung der Einzelsysteme berücksichtigt, geeignet ist, das Auftreten dieses Problems abzuschwächen und starke Konsistenz herzustellen.

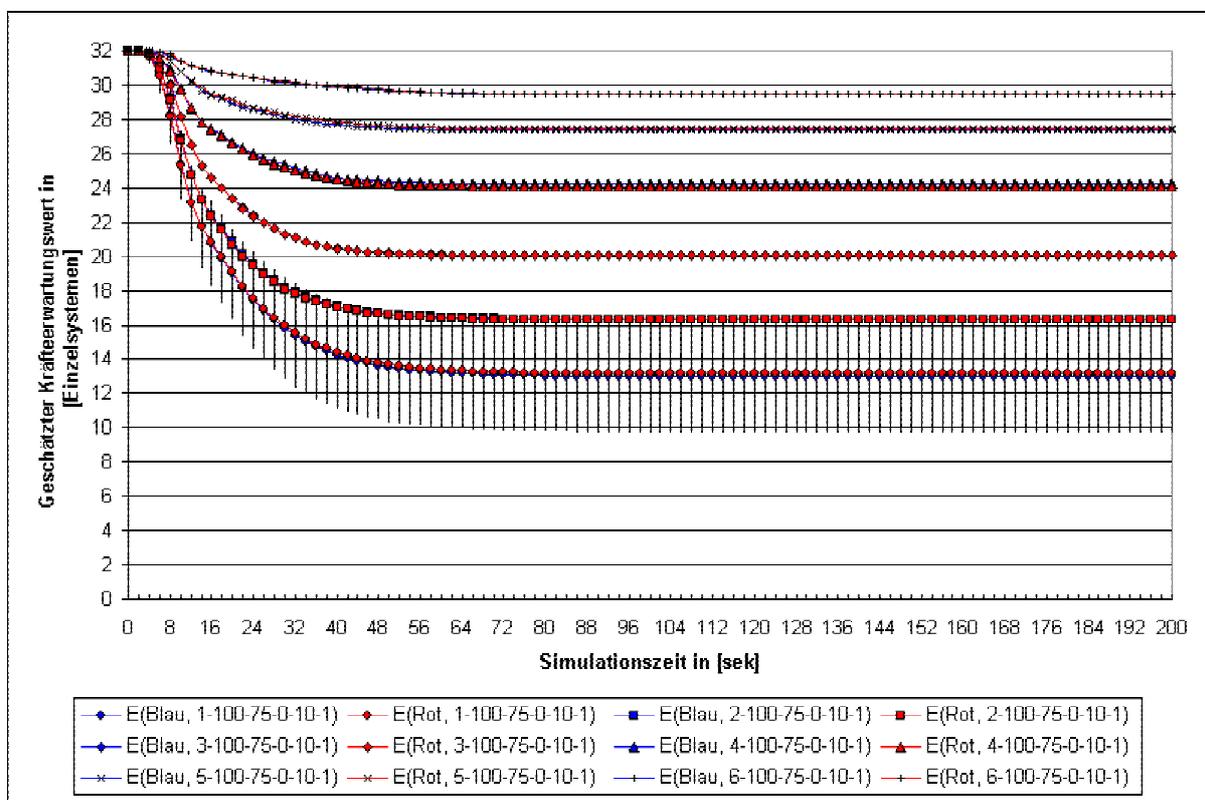


Abbildung 7.70: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-100-75-0-10-1)

²⁹⁸ vgl. Kapitel 7.4.6, S. 232ff

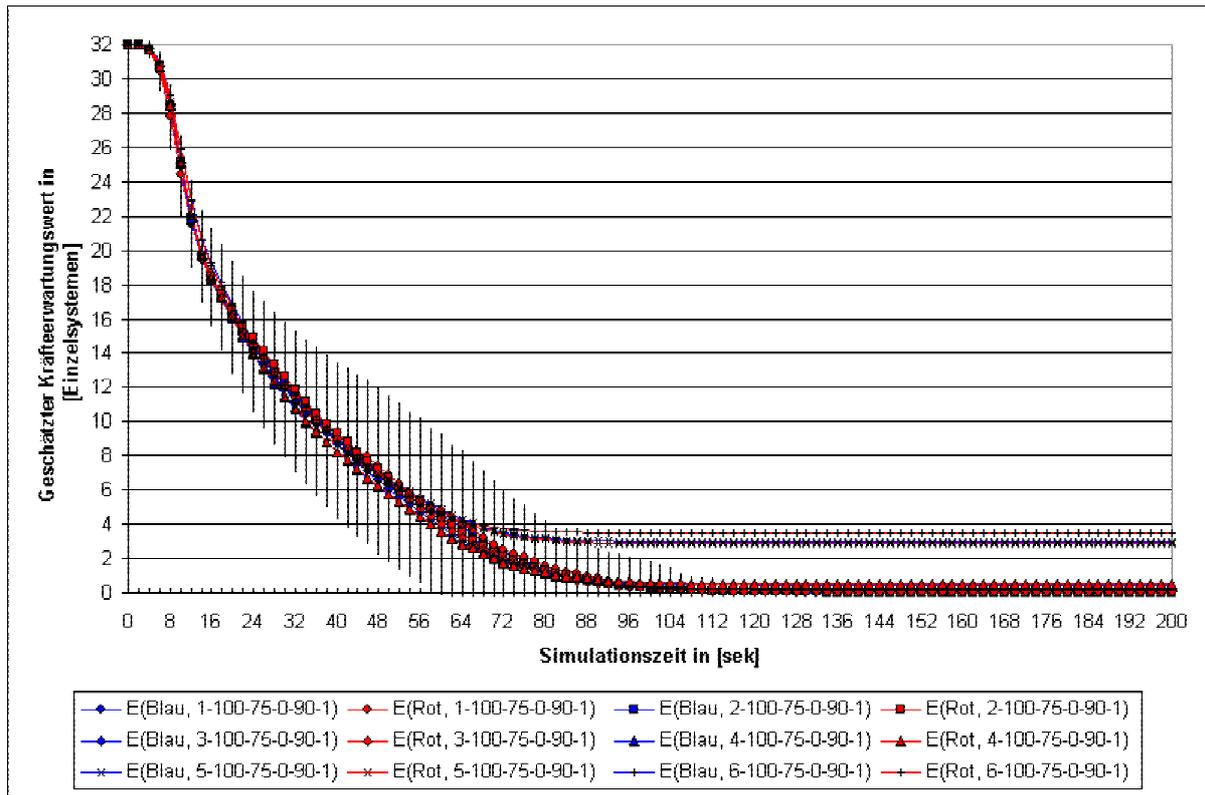


Abbildung 7.71: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-100-75-0-90-1)

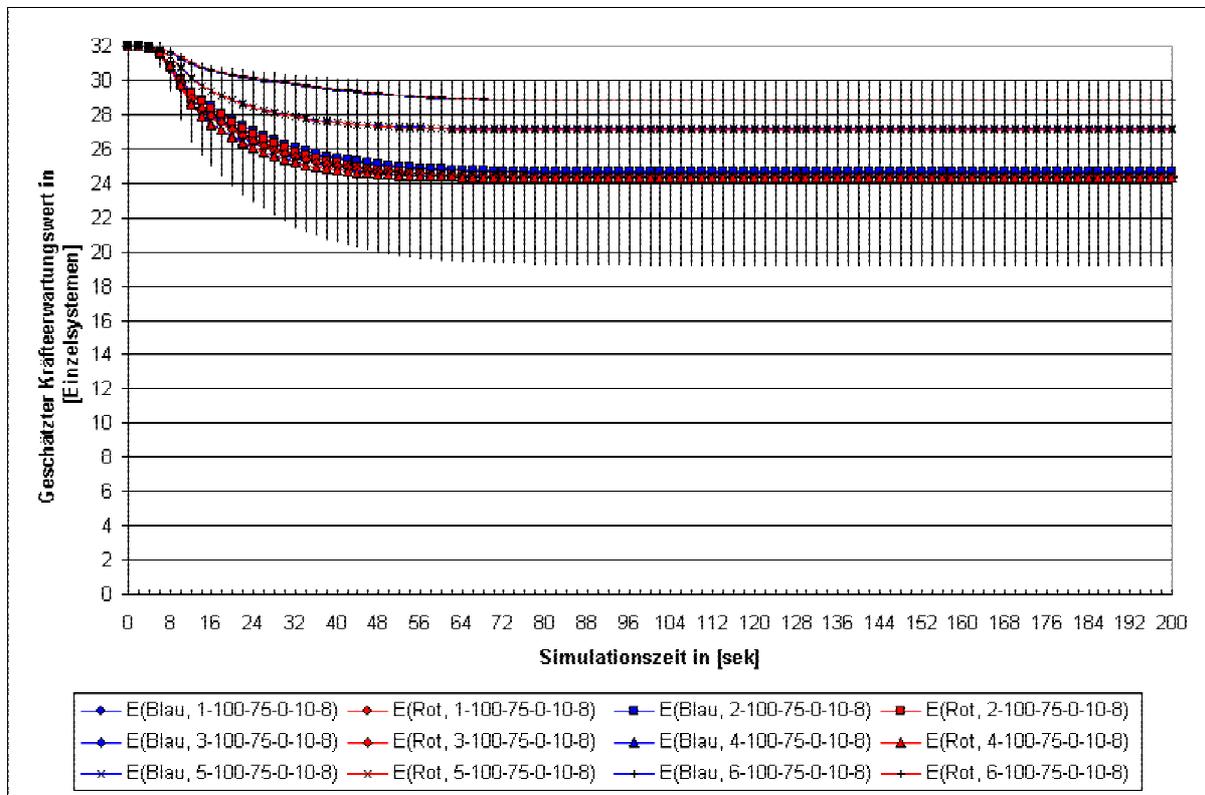


Abbildung 7.72: Verlauf der geschätzten Kräfteerwartungswerte der Parteien Blau und Rot (Variantengruppe x-100-75-0-10-8)

7.4.8 Zusammenfassung zu den Ergebnissen der Versuchsreihe III

Die Ergebnisse der Versuchsreihe III zeigen, dass das vermutete Problem des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen (im aggregierten Fall) zu einer Abweichung der Ergebnisse der aggregierten Abbildung von den Ergebnissen der nicht aggregierten Abbildung führen kann. In Abhängigkeit von der Geländerauhigkeit²⁹⁹ sowie der räumlichen Verteilung der Einzelsysteme, welche zu aggregierten Gefechtselementen zusammengefasst werden, können diese Abweichungen ein für die Konsistenzbetrachtung signifikantes Ausmaß erreichen.

Die festgestellten Abweichungen betreffen alle betrachteten Bewertungsgrößen mit Ausnahme der relativen Gewinnhäufigkeit, bei der aufgrund der Symmetrie der vorgenommenen Variationen jedoch auch nicht mit einer Abweichung zu rechnen war.

Die in Abhängigkeit von der Variation der Sichtkontaktwahrscheinlichkeit und Sichtbereichsgruppengröße festgestellten Abweichungen zeigen, dass durch geeignete Bildung der aggregierten Gefechtselemente die Abweichungen in den betrachteten Bewertungsgrößen stets auf ein nicht signifikantes Ausmaß reduziert werden können.

Unter einer „geeigneten Bildung“ der aggregierten Gefechtselemente ist dabei zu verstehen, dass grundsätzlich nur solche Einzelsysteme zusammengefasst werden, welche über weitgehend identische Sichtbereiche verfügen.

Für die geforderte Übereinstimmung der Sichtbereiche ist offensichtlich zum Einen die Beschaffenheit, d.h. vor allem das Höhenprofil und der Bewuchs/die Bebauung, des jeweiligen Geländes³⁰⁰ sowie zum Anderen die räumliche Dislozierung der Einzelsysteme ausschlaggebend.

Dies lässt den Schluss zu, dass gerade solche Einzelsysteme für die Bildung aggregierter Gefechtselemente geeignet sind, welche aufgrund ihres individuellen Typs und ihrer verwendeten Einsatztaktik grundsätzlich nur in einer begrenzten räumlichen Umgebung disloziert werden. Dies gilt für die Soldaten eines Schützen-/Waffentrupps der Infanterie sowie mit Einschränkungen³⁰¹ für die Gefechtsfahrzeuge eines Zuges. Verfügen Einzelsysteme dagegen aufgrund eines schwierigen Geländes und ihrer Dislozierung über stark divergierende Sichtbereiche, so sollte zur Wahrung der Konsistenz davon abgesehen werden, sie in aggregierten Gefechtselementen zusammenzufassen.

Für die Abbildungsgüte der Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips stellt das beschriebene Problem keine generelle Beschränkung dar. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern jedoch einen Anhalt für die Modellierung, bei dessen Beachtung sichergestellt werden kann, dass starke Konsistenz im Sinne der Definition von [Davis, Bigelow 98] gegeben ist.

²⁹⁹ Im Rahmen der modifizierten Abbildung des Zielaufklärungsprozesses wird die Geländerauhigkeit mit Hilfe der neu eingeführten Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten nachgebildet (vgl. Kapitel 7.4, S. 224ff).

³⁰⁰ Es muss hier festgestellt werden, dass der jeweilige Einfluss des Faktors Geländebeschaffenheit direkt von der in dem einzelnen Modell gewählten Auflösung der Geländeabbildung abhängt (vgl. Fußnote 295).

³⁰¹ Gerade moderne Gefechtsfahrzeuge verfügen über die technischen Mittel, um auch über größerer Distanzen und ohne direkten Sichtkontakt zwischen den Fahrzeugen die Führungsfähigkeit einer Teileinheit zu erhalten. Jedoch kann auch bei den Gefechtsfahrzeugen eines Zuges grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass diese in schwierigerem Gelände in engerer räumlicher Nähe agieren und somit über weitgehend identische Sichtbereiche verfügen.

7.5 Abschließende Bewertung der Ergebnisse aller Versuchsreihen

Die Ergebnisse der Versuchsreihen I-III bestätigen die grundsätzliche Eignung des Leitschützenprinzips als Ansatz zur Aggregation in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen.

Die Auswertung der **Versuchsreihe I** zeigt einerseits, dass mit Hilfe des Leitschützenprinzips eine im Sinne der verwendeten Definition konsistente Aggregation möglich ist. Andererseits lässt sich feststellen, dass die Beschränkung der individuellen Handlungsmöglichkeiten auf aggregierte Gefechtselemente sowie die Reduzierung der notwendigen Geländeschnitte zur Sichtlinienüberprüfung – als Kernaspekte der Aggregation – zu der **gewünschten Verbesserung des Rechenzeitverhaltens** gegenüber einer nicht aggregierten Abbildung führen.

Um eine signifikante Abweichung zwischen den Ergebnissen der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung zu vermeiden, ist es jedoch notwendig, Grenzen bei der Anwendung des Leitschützenprinzips zu beachten.

Die Ergebnisse der **Versuchsreihe II** zeigen, dass bei gegnerischen Gefechtselementen, welche im Verlauf eine Gefechts potentiell interagieren, **stark asymmetrische Mächtigkeiten vermieden werden müssen**. Geschieht dies nicht, so kann dies zu einer **signifikanten Verschiebung der relativen Gewinnhäufigkeiten** zwischen den beiden Parteien führen.

Da diese Verschiebung nicht auf einer Veränderung des abgebildeten Szenars beruht, sondern einzig auf Besonderheiten des verwendeten Aggregationsansatzes, wäre damit die geforderte Konsistenz zwischen aggregierter und nicht aggregierter Abbildung in einer wesentlichen Bewertungsgröße verletzt. Bei Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips sollten für aggregierte Gefechtselemente feindlicher Parteien deshalb stets vergleichbare Mächtigkeiten gewählt werden, solange nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese im Verlauf eines simulierten Gefechts interagieren, d.h. gegenseitiger Zielaufklärung und Abnutzung unterliegen.

Die Analyse der Ergebnisse von **Versuchsreihe III** lassen schließlich erkennen, dass das Problem des Informationsverlustes bei **Sichtlinienbestimmungen (im aggregierten Fall)** tatsächlich zu den vermuteten **Über- bzw. Unterbewertungen von Sichtmöglichkeiten** und damit zu **Abweichungen zwischen den Ergebnissen der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung** führen kann. Bei der Zusammenfassung von Einzelsystemen mit stark divergierenden Sichtbereichen sind besonders bei schwierigem Gelände und ungeeigneter Bildung der aggregierten Gefechtselemente signifikante Abweichungen zu erwarten.

Gleichzeitig machen die Ergebnisse jedoch deutlich, dass das Problem bei einer adäquaten Bildung der aggregierten Gefechtselemente selbst bei schwieriger Geländebeschaffenheit vermieden werden kann. Für eine adäquate Bildung der aggregierten Gefechtselemente ist es notwendig, die Dislozierung der Einzelsysteme sowie die jeweilige Geländebeschaffenheit zu berücksichtigen. In aggregierten Gefechtselementen sollten aus diesem Grund stets nur Einzelsysteme zusammengefasst werden, welche im Modell über weitgehend identische Sichtbereiche verfügen.

In einem überwiegend offenen Gelände mit guten Sichtmöglichkeiten können aggregierte Gefechtselemente grundsätzlich auch aus Einzelsystemen gebildet werden, welche über eine größere Fläche disloziert sind. Verfügen diese Einzelsysteme über weitgehend identische Sichtbereiche, so führt dies nicht zu einem Verlust der Konsistenz. In schwierigem Gelände, welches aufgrund seines Höhenprofils bzw. der vorliegenden Bewuchs-/Bebauungstypen nur schlechte Sichtmöglichkeiten bietet, sollten dagegen grundsätzlich nur Einzelsysteme zusam-

mengefasst werden, welche sich in einer engen räumlichen Umgebung befinden und damit trotz der Geländerauigkeit über die geforderten weitgehend identischen Sichtbereiche verfügen.

Zusammenfassend kann als Ergebnis aller Versuchsreihen festgestellt werden, dass das **Leitschützenprinzip gerade zur Aggregation von Infanteriekräften in Trupp- bzw. Gruppenstärke geeignet** erscheint, da diese in der militärischen Realität grundsätzlich auf relativ kleinem Raum disloziert sind und damit – bei den in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen üblicherweise verwendeten Geländeaufösungen – über zumeist weitgehend identische Sichtbereiche verfügen. Wird bei der Aggregation dieser Kräfte zusätzlich für alle Parteien auf die Verwendung vergleichbarer Mächtigkeiten geachtet, so ist sichergestellt, dass selbst bei schwierigem Gelände starke Konsistenz zwischen aggregierter und nicht aggregierter Abbildung vorliegt. Die aggregierte Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips besitzt dabei ein deutlich **verbessertes Rechenzeitverhalten**, welches wiederum gerade bei der Abbildung einer großen Zahl von Infanteriekräften genutzt werden kann.

Eine aggregierte Abbildung von Gefechtsfahrzeugen (etwa im Zugrahmen) ist mit Hilfe des Leitschützenprinzips ebenfalls möglich. Ob eine solche Abbildung konsistent erfolgen kann, hängt wiederum von der räumlichen Dislozierung der Einzelsysteme sowie der Schwierigkeit des gegebenen Geländes ab.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass auch vor dem Hintergrund des veränderten Aufgabenspektrums moderner Streitkräfte eine adäquate Unterstützung durch Hilfsmittel der Modellbildung & Simulation (M&S) notwendig ist, um militärischem Personal die geforderte hohe Flexibilität zu ermöglichen. Hochauflösende Gefechtssimulationssysteme stellen im Bereich der M&S ein wichtiges Teilgebiet dar. Damit diese sinnvoll verwendet werden können, müssen sie jedoch grundsätzlich in der Lage sein, häufig wechselnde Einsatzszenarien flexibel und schnell abzubilden und zu verarbeiten.

Trotz der unbestreitbaren Vorteile einer detaillierteren, nicht aggregierten Simulation eines Gefechts kann auch in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen aus einer Reihe von Gründen nicht auf Aggregation verzichtet werden. Zu diesen Gründen zählen neben dem zumeist besseren Rechenzeitverhalten aggregierter Modelle, welche diese gerade für abgesetzte Anwendungen auf Kleinrechnern attraktiv erscheinen lassen, vor allem die Möglichkeit zur direkten Verarbeitung unscharfer (aggregierter) Fragestellungen sowie aufgrund einer geringeren Menge an Ursache- und Wirkungsbeziehungen eine leichtere Deutbarkeit erhaltener Simulationsergebnisse. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, die Vorteile aggregierter und nicht aggregierter Abbildung – je nach speziellem Analysezweck – durch Kopplung entsprechender Modelle zu verbinden. Eine Reihe von Strategien zur Kopplung aggregierter und nicht aggregierter Modelle sowie die daraus erwachsenden Probleme wurden deshalb vorgestellt und diskutiert.

Für die Verwendung in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen macht eine solche Kopplung aggregierter und nicht aggregierter Modelle allerdings nur Sinn, wenn die geforderte Flexibilität in der Abbildung und Verarbeitung von Szenarien gewährleistet werden kann. Eine Betrachtung existierender Aggregationsansätze zeigt, dass diese dazu zumeist jedoch nicht in der Lage sind. Die dort Verwendung findenden aggregierten Modellparameter, welche über keine direkt messbaren Entsprechungen in der militärischen Realität verfügen, führen zu einer hohen Szenarabhängigkeit der Aggregationsansätze. Dies in Verbindung mit der Notwendigkeit, die aggregierten Modellparameter jeweils durch (zeitintensive) analytische Überlegungen bzw. Rechenexperimente mit nicht aggregierten Modellen zu bestimmen, macht bereits bei kleinen Änderungen eines Szenars einen hohen Aufwand zur Neukalibrierung des jeweiligen Aggregationsansatzes notwendig.

Die betrachteten Aggregationsansätze sind daneben zumeist auch nur eingeschränkt geeignet, wichtige Aspekte eines modernen Gefechts der verbundenen Waffen abzubilden und zu verarbeiten. Gerade die große Heterogenität in der Waffensystemzusammenstellung der beteiligten Streitkräfte, die hohe Mobilität der Gefechtsführung sowie Synergieeffekte, welche aufgrund des Zusammenwirkens unterschiedlicher Waffensystemtypen auftreten, stellen sie vor Probleme.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuer Ansatz zur Aggregation in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen entwickelt und mittels einer Reihe systematischer Rechenexperimente auf seine Güte überprüft. Das sogenannte „Leitschützenprinzip“ sieht die Zusammenfassung homogener Einzelsysteme in aggregierten Gefechtselementen vor. Die Fähigkeit zur Durchführung der elementaren Gefechtsprozesse Zielaufklärung, aktive Abnutzung und Bewegung wird auf diese beschränkt, so dass individuelle Einzelsysteme nur noch im Verbund ihres jeweiligen aggregierten Gefechtselementes handeln können. Die Informationen über den individuellen Zustand der zusammengefassten Einzelsysteme bleiben im Leitschützenprinzip grundsätzlich erhalten. Dies ermöglicht die Modellie-

rung der elementaren Gefechtsprozesse mittels geringfügig modifizierter Algorithmen nicht aggregierter Gefechtssimulationssysteme. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, zum Einen auf aggregierte Modellparameter zu verzichten und damit die daraus resultierenden Probleme bisheriger Aggregationsansätze zu vermeiden. Zum Anderen erlaubt der Ansatz über die Bildung der aggregierten Gefechtselemente eine flexible Bestimmung des jeweils gewünschten Aggregationsgrades. Daneben reduziert das Leitschützenprinzip durch die Beschränkung der individuellen Handlungsfähigkeit auf aggregierte Gefechtselemente die Anzahl (parallel) zu verwaltender Ereignisse sowie die Zahl notwendiger Geländeschnitte zur Sichtlinienüberprüfung. Beides führt insgesamt zu einer deutlichen Verbesserung des Rechenzeitverhaltens.

Mit dem Experimentalsystem SAMBA wurde eine prototypische Umsetzung des Leitschützenprinzips realisiert. Diese beschränkt sich bisher aus Gründen der Überschaubarkeit auf die Abbildung des Flachfeuergefechts von Infanteriekräften innerhalb der Sturm- und Einbruchphase, kann aber jederzeit auch um die Abbildung von Gefechtsfahrzeugen und Steilfeuerwaffensystemen erweitert werden. Im Rahmen von SAMBA gelang es, gängige Algorithmen nicht aggregierter Gefechtssimulationssysteme geeignet zu modifizieren, um diese im Rahmen des Leitschützenprinzips zur aggregierten Abbildung der elementaren Gefechtsprozesse Zielaufklärung, aktive und passive Abnutzung mit/durch Flachfeuer sowie Bewegung einzusetzen. Die modifizierten Algorithmen sind in der Lage, wechselnde Aggregationsgrade zu verarbeiten, so dass SAMBA auch zur nicht aggregierten Abbildung eingesetzt werden kann.

Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen I-III wurden mit Hilfe von SAMBA das Rechenzeitverhalten, die Abbildungsgüte sowie vermutete Problemfelder des Leitschützenprinzips untersucht. Die Bewertung der Abbildungsgüte erfolgt dabei mit Hilfe des in [Davis, Bigelow 98] definierten Konsistenzbegriffs. Während die Ergebnisse der Versuchsreihe I die allgemeine Eignung des Leitschützenprinzips zur flexiblen, konsistenten Aggregation sowie das verbesserte Rechenzeitverhalten belegen, zeigen die Ergebnisse der Versuchsreihen II und III Probleme und Grenzen, welche sich bei ungeeigneter Verwendung des Ansatzes ergeben. Als problematisch erweist sich zum Einen die Verwendung sehr unterschiedlicher Mächtigkeiten bei der Aggregation feindlicher Gefechtselemente, welche im Verlauf eines Gefechts potentiell interagieren. Eine solche asymmetrische Aggregation sowie zum Anderen die Zusammenfassung von Einzelsystemen mit deutlich divergierenden Sichtbereichen in aggregierten Gefechtselementen führen zu signifikanten Abweichungen zwischen den Ergebnissen der aggregierten und nicht aggregierten Abbildung und damit – im Sinne der Definition – zu Inkonsistenz. Die Ergebnisse beider Versuchsreihen lassen jedoch gleichzeitig den Schluss zu, dass bei adäquater Bildung der aggregierten Gefechtselemente die beobachteten Probleme vermieden werden können und somit das Leitschützenprinzip seine generelle Eignung zur konsistenten Aggregation behält. Bei Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips sollte deshalb stets darauf geachtet werden, dass in Abhängigkeit von der jeweiligen Geländerauigkeit nur solche Einzelsysteme zu aggregierten Gefechtselementen – vergleichbarer Mächtigkeit – zusammengefasst werden, welche aufgrund ihrer räumlichen Nähe über weitgehend identische Sichtbereiche verfügen.

Gerade Infanteriekräfte der militärischen Hierarchieebenen des Trupps bzw. der Gruppe, deren Wirken in bisherigen Gefechtssimulationssystemen wegen ihrer großen Zahl häufig mit Hilfe der Modelle von Lanchester modelliert wurden, sind wegen ihrer zumeist engen räumlichen Dislozierung prädestiniert für eine aggregierte Abbildung mit Hilfe des Leitschützenprinzips. Auch die Abbildung von Zügen homogener Gefechtsfahrzeuge durch aggregierte Gefechtselemente ist mit Hilfe des Leitschützenprinzips möglich. Versuchsreihe III zeigt jedoch, dass in einem solchen Fall besonders auf die Beschaffenheit des abgebildeten Geländes

geachtet werden muss, da die – gegenüber Infanteriekräften – größeren Distanzen zwischen den Einzelfahrzeugen bei schwierigem Gelände zu einer signifikanten Verfälschung der Ergebnisse der aggregierte Abbildung führen können.

Eine aggregierte Abbildung höherer militärischer Hierarchieebenen als des Trupps bzw. der Gruppe bei Infanteristen sowie des Zuges bei Gefechtsfahrzeugen durch einzelne aggregierte Gefechtselemente sollte generell vermieden werden. Zum Einen verfügen die in größeren Teil-/Einheiten zusammengefassten Kräfte zumeist nicht über die geforderte Homogenität, zum Anderen sind diese häufig über größere räumliche Bereiche disloziert, so dass divergierende Sichtbereiche zu Inkonsistenzen führen können.

Im Rahmen zukünftiger Arbeiten könnte es von Interesse sein, die Auswirkungen der aus der Beschaffenheit eines Geländes resultierenden Sichtmöglichkeiten auf die Abbildungsgüte des Leitschützenprinzips systematisch zu untersuchen. Das Ziel dieser Untersuchungen sollte es sein, mit Hilfe eines analytischen Ansatzes die auftretenden Abweichungen in den Ergebnissen der aggregierten Abbildung in Abhängigkeit von messbaren Größen eines Geländes zu setzen. Gelingt dies, so könnten die gefundenen Abhängigkeiten dazu genutzt werden, für ein gegebenes Gelände im Vorgriff auf die Simulation eines Gefechts die zu erwartenden Verfälschungen zu ermitteln und diese in der Modellierung durch geeignete Korrekturfaktoren auszugleichen. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass eine solche Modifizierung des Leitschützenprinzips durch geländeabhängige Korrekturfaktoren analog zu der Verwendung aggregierter Modellparameter die Gefahr einer Szenarabhängigkeit des Ansatzes beinhaltet. Diese Modifizierung sollte deshalb nur dann vorgenommen werden, wenn die notwendige Bestimmung der Korrekturfaktoren weitgehend automatisch und innerhalb eines vertretbaren Zeitrahmens erfolgen kann.

Weiterhin erscheint es sinnvoll, das Experimentalsystem SAMBA probeweise um die – in der Zusammenfassung von Versuchsreihe II – beschriebene Möglichkeit zur zeitparallelen Bekämpfung mehrerer aggregierter Gefechtselemente durch die Einzelsysteme eines Gefechtselementes zu erweitern. Mit Hilfe weiterer Rechenexperimente kann dann einerseits festgestellt werden, ob dieser Ansatz wie erhofft dazu geeignet ist, die Verschwendung von Feuerkraft durch aggregierte Gefechtselemente großer Mächtigkeit auf Gefechtselemente kleiner Mächtigkeit zu vermindern und damit das beschriebene Problem asymmetrischer Mächtigkeiten zu begrenzen. Da diese Modifikation des ursprünglichen Leitschützenprinzips eine zeitliche Synchronisation der parallel stattfindenden Abnutzungsprozesse der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes voraussetzt, ist es andererseits notwendig, im Rahmen der Rechenexperimente die Auswirkungen des hinzugekommenen (gefechtselementinternen) Koordinationsaufwandes auf das Rechenzeitverhalten des Systems zu untersuchen. Bei einem positiven Ergebnis dieser Untersuchungen sollte der Ansatz des Leitschützenprinzips entsprechend angepasst werden.

Abschließend lässt sich feststellen, dass das Leitschützenprinzip als flexibler Aggregationsansatz für die zukünftige Entwicklung neuer bzw. die Weiterentwicklung bereits bestehender hochauflösender Gefechtssimulationssysteme gut geeignet erscheint. Bei adäquater Bildung der aggregierten Gefechtselemente ist dabei neben einem verbesserten Rechenzeitverhalten mit einer hohen Abbildungsgüte zu rechnen, welche z.B. die Kopplung der nicht aggregierten Abbildung von Gefechtsfahrzeugen mit der aggregierten Abbildung von Infanteriekräften in einem Modell ermöglicht. Durch den Verzicht auf aggregierte Modellparameter vermeidet das Leitschützenprinzip die hohe Szenarabhängigkeit anderer Aggregationsansätze, so dass ein solches Modell eine große Flexibilität in der Abbildung und Verarbeitung wechselnder Szenarien besitzt.

ANHANG A – VERLUSTBEWERTUNG BEI STEILFEUERBESCHUSS BEIM LEITSCHÜTZENPRINZIP

Im Rahmen der Aggregation mit Hilfe des Leitschützenprinzips werden homogene Einzelsysteme in aggregierten Gefechtselementen zusammengefasst. Die Zahl der zu einem gegebenen Simulationszeitpunkt nicht ausgefallenen Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes wird als dessen Mächtigkeit bezeichnet. Die Mächtigkeit aggregierter Gefechtselemente kann offensichtlich im Verlauf eines Gefechts Veränderungen unterliegen, typischerweise etwa einer Verringerung durch feindliche Abnutzungsprozesse. Modelle, welche die elementaren Gefechtsprozesse aggregierter Gefechtselemente abbilden, müssen deshalb dynamisch wechselnde Mächtigkeiten verarbeiten können. Im Rahmen des vorgestellten Modells SAMBA wurden derartige Modelle zur Abbildung der *Zielaufklärung*, *Bewegung* sowie der *aktiven und passiven Abnutzung mit/durch Flachfeuer* entwickelt und exemplarisch umgesetzt.

Für die Abbildung des modernen Gefechts der verbundenen Waffen stellt neben den bereits existierenden vor allem ein geeignetes Modell zur Abbildung der aktiven/passiven Abnutzung mit/durch Steilfeuer eine wichtige Komponente dar. Auf die Realisierung eines solchen Modells wurde bisher in SAMBA aus Gründen der Einfachheit verzichtet. Eine mögliche Vorgehensweise zur Abbildung der passiven Abnutzung durch Steilfeuer wird aber der Vollständigkeit halber im Rahmen dieses Anhangs erläutert.³⁰²

Ein Modell zur Abbildung der passiven Abnutzung durch Steilfeuer muss die Zahl der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes bestimmen, welche durch einen Steilfeuerbeschuss *ausfallen*, *beschädigt* oder *niedergehalten werden* bzw. *nicht betroffen* sind. Diese Verlustbewertung erfolgt üblicherweise in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen für ein einzelnes Steilfeuergeschoss durch einen Vergleich der Koordinaten des Einschlagpunktes mit den Koordinatenpositionen potentiell betroffener Einzelsysteme. Dabei finden zumeist ziel- und geschosstypabhängige Letal- bzw. Niederhalteradien Berücksichtigung. Die Umsetzung dieser Vorgehensweise in ein zum Leitschützenprinzip konformes Modell kann folgendermaßen geschehen:

- (1) In einem gegebenen Gefechtssimulationssystem sei \tilde{T} die Menge aller unterschiedlicher Zieltypen und \tilde{M} die Menge der Munitionstypen der abgebildeten Steilfeuerwaffensysteme. Sei ferner $z_{\text{imp}} = (x_{\text{imp}}, y_{\text{imp}})$ die Koordinatenposition des Einschlagpunktes eines Steilfeuergeschosses.
- (2) Für einen Munitionstyp $m \in \tilde{M}$ existiert dann eine Menge an Letalradien sowie eine zweite Menge an Niederhalteradien. Diese spezifizieren für jeden Zieltyp aus \tilde{T} , in welcher Distanz von einem explodierenden Geschoss des Munitionstyps ein Einzelsystem des jeweiligen Zieltyps als *ausgefallen* bzw. *niedergehalten* gilt.

³⁰² Auf eine Darstellung der möglichen Umsetzung eines Modells zur Abbildung der aktiven Abnutzung mit Steilfeuer wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da diese mit bekannten Modellen nicht aggregierter Gefechtssimulationssysteme relativ problemlos möglich ist. Hierbei muss natürlich wiederum geeignet berücksichtigt werden, dass mehrere Steilfeuerwaffensysteme eines aggregierten Gefechtselementes einen Bekämpfungsvorgang geschlossen durchführen. Da dies für Steilfeuerwaffensysteme jedoch auch in der militärischen Realität durchaus üblich ist, ist hier mit keinen wesentlichen Verfälschungen gegenüber einer Einzelsystemabbildung zu rechnen.

$$\begin{aligned}\tilde{D}_L(m) &= \left\{ d_L^1, \dots, d_L^{|\tilde{T}|} \right\} \\ \tilde{D}_{Sup}(m) &= \left\{ d_{Sup}^1, \dots, d_{Sup}^{|\tilde{T}|} \right\}\end{aligned}\quad (\text{A.1})$$

mit

$$\begin{aligned}\tilde{D}_L(m) &= \text{Menge unterschiedlicher Letalradien des Munitionstyps } m \in \tilde{M} \\ \tilde{D}_{Sup}(m) &= \text{Menge unterschiedlicher Niederhalteradien des Munitionstyps } m \in \tilde{M} \\ d_L^\sigma &= \text{Letalradius des Munitionstyps } m \text{ für Zieltyp } \sigma \\ d_{Sup}^\sigma &= \text{Niederhalteradius des Munitionstyps } m \text{ für Zieltyp } \sigma\end{aligned}$$

- (3) Aus der Menge $\tilde{F}_{B \wedge R}$ aller abgebildeten aggregierten Gefechtselemente beider Parteien wird nun die Menge $\tilde{F}_{L \vee Sup}$ der aggregierten Gefechtselemente bestimmt, welche potentiell durch den Einschlag des Geschosses betroffen sein können. Zu diesem Zweck wird zunächst der maximale Niederhalteradius d_{Sup}^{Max} des Munitionstyps m ermittelt.³⁰³

$$d_{Sup}^{Max} = \max_{\sigma} \left(\tilde{D}_{Sup}(m) \right) \quad (\text{A.2})$$

Mit diesem gilt dann:

$$\tilde{F}_{L \vee Sup} = \left\{ F \mid F \in F_{B \wedge R} \wedge d(z_{Imp}, z_F) \leq d_{Sup}^{Max} \right\} \quad (\text{A.3})$$

wobei

$$\begin{aligned}z_{Imp} &= \text{Koordinate des Geschosseinschlagpunktes} \\ z_F &= \text{Koordinate des aggregierten Gefechtselementes } F \in \tilde{F}_{B \wedge R} \\ d(z_{Imp}, z_F) &= \text{Distanz zwischen } z_{Imp} \text{ und } z_F\end{aligned}$$

- (4) Im nächsten Schritt werden sukzessive alle aggregierten Gefechtselemente $F \in \tilde{F}_{L \vee Sup}$ betrachtet und für jedes die Menge $\tilde{E}_{Steil}(F)$ der Einzelsysteme bestimmt, welche sich zum Zeitpunkt des Geschosseinschlags im Zustand „*Erleideraktiv gegenüber Steilfeuer*“ befinden.
- (5) Für alle Einzelsysteme $e^p \in \tilde{E}_{Steil}(F)$ eines aggregierten Gefechtselementes werden dann ihre individuellen Koordinatenpositionen z_{e^p} anhand der gegebenen Koordinatenposition z_F des Gefechtselementes bestimmt. Dies kann durch das entsprechende, im System für die Abbildung der Zielaufklärung notwendigerweise enthaltene Verfahren (vgl. Kapitel 5.1.4.2) erfolgen.

³⁰³ Auf eine Betrachtung des maximalen Letalradius kann hier verzichtet werden, da für einen gegebenen Zieltyp offensichtlich stets $d_{Sup}^\sigma \geq d_L^\sigma$ gelten muss.

(6) Durch Vergleich der Distanz $d(z_{\text{Imp}}, z_{e^\rho})$ zwischen der Koordinate des Geschosseinschlagpunktes sowie der jeweiligen Koordinate des Einzelsystems e^ρ (vom Zieltyp σ) mit dem ebenfalls gegebenen Lethalradius d_L^σ sowie dem Niederhalteradius d_{Sup}^σ kann abschließend bestimmt werden, ob das Einzelsystem *ausgefallen*, *niedergehalten* oder *nicht betroffen* ist. Dazu gilt:

$$e^\rho \text{ ist } \left\{ \begin{array}{l} \text{ausgefallen} \\ \text{niedergehalten} \\ \text{nicht betroffen} \end{array} \right\}, \text{ wenn } \left\{ \begin{array}{l} d(z_{\text{Imp}}, z_{e^\rho}) \leq d_L^\sigma \\ d_L^\sigma < d(z_{\text{Imp}}, z_{e^\rho}) \leq d_{\text{Sup}}^\sigma \\ \text{sonst} \end{array} \right\} \quad (\text{A.4})$$

wobei

$$\begin{aligned} d(z_{\text{Imp}}, z_{e^\rho}) &= \text{Distanz zwischen } z_{\text{Imp}} \text{ und } z_{e^\rho} \\ z_{e^\rho} &= \text{Koordinate des Einzelsystems } e^\rho \\ z_{\text{Imp}} &= \text{Koordinate des Geschosseinschlagpunktes} \end{aligned}$$

(7) Sollen für einzelne Zieltypen, wie etwa Gefechtsfahrzeuge, weitere Schadensklassen unterschieden werden (z.B. Ausfall der Bewegungsfähigkeit), so kann dies durch Angabe zusätzlicher Radien realisiert werden.

Gegenüber der Einzelfahrzeugabbildung eines nicht aggregierten Systems kann im aggregierten Fall einzig durch die Bestimmung der individuellen Koordinatenpositionen der Einzelsysteme eines aggregierten Gefechtselementes (Schritt 5) eine Verfälschung entstehen. Wird die Bestimmung der Koordinatenpositionen jedoch durch ein geeignetes Verfahren, wie zum Beispiel Dislozierungsschablonen, sinnvoll realisiert, so kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Verfälschung auf eine Bewertung der Abbildungsgüte nicht signifikant auswirkt.

Allgemein lässt sich feststellen, dass der Ansatz der Verwendung von Letal- und Niederhalteradien Raum für Verbesserungen lässt. Die scharfe Trennung zwischen einem Bereich mit konstant gleicher Gefährdung sowie einem nicht gefährdeten Bereich durch die genaue Entfernungsangabe (Radius) stellt gegenüber der realen Situation sicherlich nur eine Näherung dar. In der militärischen Realität wäre grundsätzlich davon auszugehen, dass die Gefährdung, welche für ein Gefechtsobjekt von einem explodierenden Steilfeuergeschoss ausgeht, mit zunehmender Distanz zum Einschlagpunkt kontinuierlich abnimmt. Es liegt somit nahe, dies in einem entsprechenden Modell zur Verlustbewertung bei Steilfeuerbeschuss nachzubilden. Zu diesem Zweck könnten Wahrscheinlichkeitsfunktionen³⁰⁴ Verwendung finden, welche für eine jeweils gegebene Kombination aus Munitions- und Zieltyp den Verlauf der Ausfall- oder Niederhaltungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz zum Geschosseinschlagpunkt spezifizieren (vgl. Abbildung A.0.1). Ausgehend von der so bestimmten Ausfall- bzw. Niederhaltungswahrscheinlichkeit wäre es dann möglich, mit Hilfe eines einfachen Zufallsprozesses die Auswirkungen eines Geschosseinschlags auf alle potentiell betroffenen Einzelsysteme zu bestimmen.

³⁰⁴ Die Angabe dieser Wahrscheinlichkeitsfunktionen könnte ggf. etwa analog zu der Vorgehensweise zur Berechnung der modifizierten Entdeckungswahrscheinlichkeit (vgl. Kapitel 6.1.4.2, S. 138f) durch die Vorgabe einer Reihe von Stützpunkten geschehen.

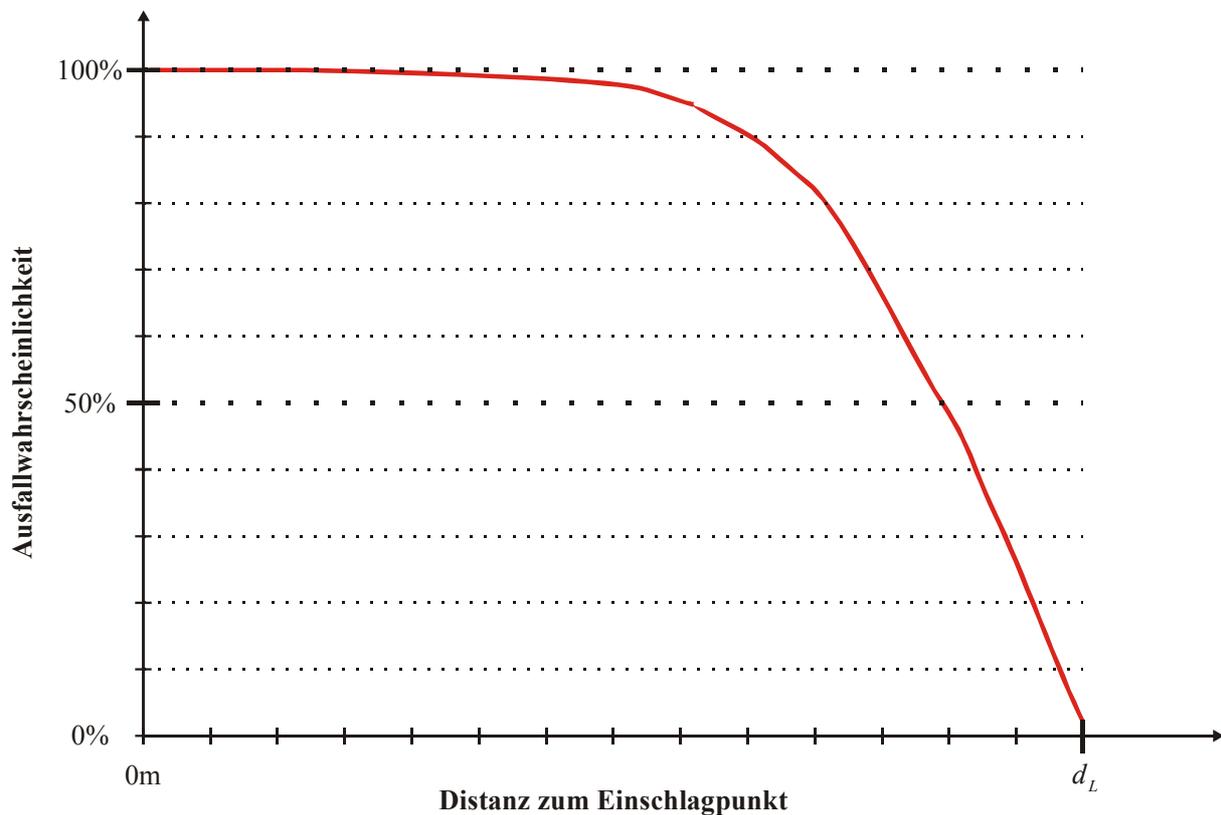


Abbildung A.0.1: Beispielhafter Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz zum Einschlagpunkt

Abschließend muss festgehalten werden, dass eine solche Vorgehensweise mit einem deutlich erhöhten Aufwand verbunden ist, da dabei für jede mögliche Kombination aus Munitions- und Zieltyp statt eines Letal- und Niederhalteradius eine eigenständige Wahrscheinlichkeitsfunktion bestimmt und in geeigneter Weise angegeben werden muss. Ob dieser zusätzliche Aufwand durch den zu erwartenden Zugewinn in der Realitätsnähe der Abbildung gerechtfertigt werden kann, hängt maßgeblich von der Genauigkeit der vorliegenden Messdaten ab, welche zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen genutzt werden. Sollte ein notwendiges Maß an Messgenauigkeit bezüglich dieser Daten nicht sichergestellt werden können oder entsprechende Daten generell nicht verfügbar sein, so ist die bewährte Verwendung von Letal- und Niederhalteradien eine adäquate und vor allem einfach umsetzbare Alternative.

ANHANG B – DETAILPROTOKOLL EINES SAMBA SIMULATIONS-LAUFES

Das Modell SAMBA ermöglicht dem Benutzer von allen oder ausgesuchten Simulationsläufen Detailprotokolle (vgl. Abbildung B.0.1) zu erstellen. Diese Protokolle haben das Ziel, den exakten Verlauf der gewählten Simulationsläufe nachvollziehbar zu machen. Form und Inhalt eines solchen Protokolls sind dabei so gewählt, dass sie eine schnelle Auswertung durch menschliche Benutzer oder spezielle Programme unterstützen. Aus diesem Grund wurde versucht, notwendige Abkürzungen möglichst sprechend zu wählen und den Aufbau einer einzelnen Eintragungen im Protokoll soweit wie möglich an die natürlich Sprache anzulehnen.

Jede Eintragung in einem Detailprotokoll repräsentiert ein eigenes Ereignis innerhalb eines Simulationslaufs. Das Format einer solchen Protokolleintragung folgt dabei grundsätzlich einem vorgegeben Schema. Es gilt:

- (1) Eine individuelle Eintragung beginnt in der ersten Spalte stets mit der *Simulationszeit* (in [sek]), zu welcher das protokollierte Ereignis stattgefunden hat. Besteht eine Eintragung aus mehreren Zeilen, so wird in den der ersten Zeile folgenden auf die erneute Angabe der Simulationszeit verzichtet, um dadurch die Zusammengehörigkeit der Zeilen zu einem einzelnen Ereignis zu verdeutlichen.
- (2) In der zweiten Spalte folgt ein Schlüsselwort in Form einer maximal *zehnstelligen englischsprachigen Abkürzung*, welche eine eindeutige Identifizierung der Art des jeweiligen Ereignisses erlaubt.
- (3) Die Spalten drei bis fünf enthalten grundsätzlich *allgemeine Informationen über das jeweilige Verursacher- bzw. Erleiderelement*. Im Einzelnen sind dies die individuelle Kennung des Elements, die Zugehörigkeit zu einer der beiden Parteien Blau oder Rot sowie die aktuelle Position in Form einer UTM-Koordinate.
- (4) Die restlichen Spalten eines Protokolleintrags enthalten ereignisspezifische Daten und Eintragungen, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Ein Detailprotokoll in SAMBA unterscheidet die folgenden Schlüsselwörter zur Identifizierung der protokollierten Ereignisse:

- **TIMETICK**

Spezielles Protokollereignis, bei dem die aktuellen Gesamtstärken beider Parteien ermittelt und gespeichert werden. Diese Eintragung weicht als einzige in den Spalten drei bis fünf von der vorgestellten Grundform ab, da hier die ermittelten Gesamtstärken für Blau und Rot protokolliert werden.

Beispiel:

(TIMETICK) Armee blue 40 [Soldaten]
(TIMETICK) Armee red 40 [Soldaten]

- **SCANSTR** (Scan Start)

SCANSTR bezeichnet den Beginn eines Aufklärungsvorgangs.

Neben den beschriebenen Standardinformationen werden keine weiteren Daten protokolliert.

Beispiel:

(SCANSTR) Schütze30 blue UTM 10100 10030

- **SCANRES** (Scan Result)

SCANRES bezeichnet das Ende eines Aufklärungsvorgangs.

Die erste Zeile dieser Eintragung enthält die Daten des aufklärenden Elements. Direkt folgende Zeilen, welche mit dem Schlüsselwort *SCANNED* beginnen, enthalten die wesentlichen Daten der feindlichen Elemente, welche das aufklärende Element entdeckt hat. Von besonderer Bedeutung ist hier bei jedem der aufgeklärten Elemente die Information darüber, welche seiner nicht ausgefallenen Einzelsysteme entdeckt wurden.

Beispiel:

(SCANRES) Schütze3 blue UTM 10100 10003 SIEHT

(SCANNED) Schütze6 red UTM 10000 10003 0 1 0 VON 1 1 1

Es wurde somit von den drei aktiven Einzelsystemen des roten Elements nur lediglich das zweite Einzelsystem durch das blaue Gefechtselement entdeckt.

- **ATTRSTR** (Attrition Start)

ATTRSTR bezeichnet den Beginn eines Bekämpfungsvorgangs.

Die erste Zeile (*ATTRSTR*) der Eintragung enthält Informationen über das Verursacherelement und den Zustand seiner Einzelsysteme. Die zweite Zeile beschreibt das zur Bekämpfung ausgewählte Erleiderelement. Alle direkt folgenden Zeilen (*POSTARG*) bezeichnen die entdeckten feindlichen Elemente, aus welchen der Verursacher das Erleiderelement ausgewählt hat. Von besonderer Bedeutung hierbei sind wiederum die Information, welche Einzelsysteme der feindlichen Elemente entdeckt wurden sowie die Information über die jeweilige Distanz zwischen Verursacher und einem entdeckten Element, da diese Daten für die erfolgte Auswahl des Erleiders ursächlich sind.

Beispiel:

(ATTRSTR) Schütze3 blue UTM 10100 10003 FEUERT MIT 'S' 1 1 'S'

(TARGET) Schütze4 red UTM 10000 10010 VON

(POSTARG) Schütze5 red UTM 10000 10030 0 1 0 VON 1 1 1 DISTANZ 102.84 [m]

(POSTARG) Schütze4 red UTM 10000 10010 1 1 0 VON 1 1 1 DISTANZ 101.27 [m]

An diesem Eintrag lässt sich erkennen, dass das blaue Gefechtselement Schütze3 mit zwei schießaktiven Einzelsystemen (zwei weitere sind mit 'S' als niedergehalten und damit nicht schießaktiv gekennzeichnet) das rote Element Schütze6 bekämpft. Die durch Schütze3 erfolgte Zielauswahl lässt sich mit Hilfe der Daten in den Zeilen 3 und 4 explizit nachvollziehen.

- **ATTRRES** (Attrition Result)

ATTRRES bezeichnet das Ende eines Bekämpfungsvorgangs.

Die erste Zeile (*ATTRRES*) enthält die wesentlichen Daten des Verursacherelements. Die zweite und dritte Zeile beschreibt die Wirkung des Abnutzungsprozesses bei dem Erleiderelement. Die zweite Zeile (*KILLED*) bezeichnet einerseits die Einzelsysteme des Erleiders, welche durch den jeweiligen Abnutzungsprozess ausgefallen sind und enthält zusätzlich die Information, wie viele Schüsse auf welches der entdeckten Einzelsysteme des Erleiders abge-

geben worden sind. Die dritte Zeile (*SUPRSSSTR*) bezeichnet die Einzelsysteme des Erleiders, welche durch den Beschuss nicht ausgefallen aber zumindest niedergehalten sind.

Beispiel:

```
(ATTRRES)  Schütze3  blue  UTM 10100 10003  TRIFFT
(KILLED)   Schütze4  red   UTM 10000 10010  GETROFFEN 1
                                                FEUERVERTEILUNG 2 0 0 AUF 1 1 0
(SUPRSSSTR) Schütze4  red   UTM 10000 10010  KEINE NIEDERHALTUNG
```

Im Beispiel feuern beide schießaktiven Einzelsysteme des Verursachers auf das erste entdeckte Einzelsystem des Erleiders. Dieses System fällt durch den Beschuss aus. Eine Niederhaltungswirkung tritt somit nicht ein.

- **SUPRSSEND** (Supression End)

SUPRSSEND bezeichnet das Ende einer Niederhaltungswirkung. Dieser einzeilige Protokolleintrag enthält die Information, für welche Einzelsysteme eines Gefechtselements die Niederhaltungswirkung, welche durch einen vorangegangenen Beschuss ausgelöst wurde, wieder beendet ist.

Beispiel:

```
(SUPRSSEND) Schütze32 red UTM 10001 10033 NIEDERHALTUNG ENDE FÜR INDEX 4
```

- **MOVESTR** (Move Start)

MOVESTR bezeichnet den Beginn eines Bewegungsprozesses. Der zugehörige Protokolleintrag beschreibt den Beginn der Bewegung eines Gefechtselements von seiner bisherigen Position zu einer neuen Zielposition. Zusätzlich angegeben wird die Geschwindigkeit (in [m/sek]) sowie die Koordinaten des Bewegungsendpunktes, falls es sich bei der jeweiligen Bewegung nur um den Teilabschnitt eines Weges handelt.

Beispiel:

```
(MOVESTR) Schütze2  blue  UTM 10401 10003  BEWEGT SICH ZU  UTM 10101 10003
                                                ÜBER UTM 10388 10013  MIT 2 [m/sek]
```

In dem hier angegebenen Beispiel bewegt sich das Gefechtselement von seiner aktuellen Position (UTM 10401 10003) zu der Zielcoordinate (UTM 10101 10003). Der nächste Wegpunkt (UTM 10388 10013) wird dazu mit einer Geschwindigkeit von 2 [m/sek] angesteuert.

- **MOVEEND** (Move End)

MOVEEND bezeichnet das Ende eines Bewegungsabschnitts. Als korrespondierender Protokolleintrag zu MOVESTR beschreibt MOVEEND den Abschluss eines gesamten Bewegungsprozesses bzw. das jeweilige Erreichen eines Teilziels innerhalb einer Folge von Wegpunkten.

Beispiel:

```
(MOVEEND) Schütze2  blue  UTM 10388 10013
```

▪ **SPEEDCHG** (Speed Change)

SPEEDCHG bezeichnet einen Wechsel der Geschwindigkeitsklasse

Der einzeilige Protokolleintrag SPEEDCHG beschreibt den Wechsel der Geschwindigkeitsklasse durch ein sich bewegendes Gefechts-element. Neben den Standardinformation enthält der Eintrag die bisherige sowie die neue Geschwindigkeitsklasse (in [%] der theoretisch möglichen Maximalgeschwindigkeit) des Elementes.

Beispiel:

*(SPEEDCHG) Schütze2 blue UTM 10388 10013 WECHSELT GESCHWINDIGKEITS-
KLASSE VON 100% AUF 75.0%*

33.7	(ATTRRES) (KILLED) (SUPRSSSTR)	Schütze30 Schütze30 Schütze30	blue red red	UTM 10101 10030 UTM 10001 10030 UTM 10001 10030	TRIFFT GETROFFEN 16 FEUERVERTEILUNG 1 0 0 1 1 1 AUF 1 0 0 1 1 1 KEINE NIEDERHALTUNG
33.7	(ATTRSTR) (TARGET) (POSTARG) (POSTARG) (POSTARG) (POSTARG) (POSTARG)	Schütze30 Schütze30 Schütze6 Schütze14 Schütze22 Schütze30 Schütze38	blue red red red red red red	UTM 10101 10030 UTM 10001 10030 UTM 10001 10006 UTM 10001 10014 UTM 10001 10022 UTM 10001 10030 UTM 10001 10038	FEUERT MIT 'S' 1 0 0 'S' 0 0 0 VON 0 0 0 1 0 1 1 1 VON 0 0 0 1 0 1 1 1 DISTANZ 102.84 [m] 0 1 0 0 0 1 1 0 VON 0 0 0 0 1 1 0 DISTANZ 101.272 [m] 0 0 0 0 1 1 0 1 VON 0 0 0 0 1 1 0 1 DISTANZ 100.319 [m] 1 0 0 1 1 1 1 1 VON 0 0 0 0 1 0 1 1 DISTANZ 100.0 [m] 0 0 1 0 1 1 1 1 VON 0 0 1 0 1 1 1 1 DISTANZ 100.319 [m]
33.8	(ATTRRES) (KILLED) (SUPRSSSTR)	Schütze6 Schütze6 Schütze6	red blue blue	UTM 10001 10006 UTM 10101 10006 UTM 10101 10006	TRIFFT GETROFFEN 7 FEUERVERTEILUNG 1 0 2 0 0 0 1 AUF 1 0 1 0 1 0 1 KEINE NIEDERHALTUNG
33.8	(ATTRSTR) (TARGET) (POSTARG) (POSTARG) (POSTARG) (POSTARG) (POSTARG)	Schütze6 Schütze6 Schütze30 Schütze6 Schütze38 Schütze22 Schütze14	red blue blue blue blue blue blue	UTM 10001 10006 UTM 10101 10006 UTM 10101 10030 UTM 10101 10006 UTM 10101 10038 UTM 10101 10022 UTM 10101 10014	FEUERT MIT 0 0 0 1 0 1 1 1 VON 0 1 0 1 0 0 0 1 VON 1 1 0 0 1 0 0 0 DISTANZ 102.84 [m] 1 0 1 0 1 0 1 0 VON 1 0 1 0 1 0 0 0 DISTANZ 100.0 [m] 0 0 0 0 0 1 1 0 VON 0 0 0 0 0 1 1 0 DISTANZ 104.995 [m] 1 1 1 0 0 0 0 0 VON 0 0 0 0 0 1 1 1 DISTANZ 101.272 [m] 1 1 1 1 0 0 0 0 VON 1 1 1 1 0 0 0 0 DISTANZ 100.319 [m]
34.0	(TIMETICK) (TIMETICK)	Armee Armee	blue red	15 [Soldaten] 17 [Soldaten]	
34.0	(SCANRES) (SCANNED) (SCANNED) (SCANNED)	Schütze6 Schütze30 Schütze6 Schütze38	red blue blue blue	UTM 10001 10006 UTM 10101 10030 UTM 10101 10006 UTM 10101 10038	SIEHT 0 1 0 0 0 0 0 0 VON 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 VON 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 VON 0 0 0 0 0 1 1 0

Abbildung B.0.1: Auszug aus einem Detailprotokoll

ANHANG C – VORSCHLAG ZUR BESTIMMUNG DER SICHTKONTAKTWAHRSCHEINLICHKEITEN IM MODELL SAMBA

Im Rahmen der Untersuchungen zur Problematik des Informationsverlustes bei Sichtlinienbestimmungen im aggregierten Fall³⁰⁵ wird in Form der entfernungsabhängigen Sichtkontaktwahrscheinlichkeit eine neue Maßgröße für die Rauigkeit eines gegebenen Geländes bzw. Geländeabschnittes eingeführt. Im Folgenden wird eine mögliche Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Sichtkontaktwahrscheinlichkeit für digitalisierte Gelände erläutert.

Zum besseren Verständnis der Vorgehensweise wird die bisher verwendete Interpretation der Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten spezifischer gefasst:

Die entfernungsabhängige Sichtkontaktwahrscheinlichkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein Gefechtselement in dem jeweiligen Gelände aus einer gewählten Stellung heraus Sichtkontakt zu Geländepunkten hat, welche in der Entfernung d innerhalb des Beobachtungsbereiches des Gefechtselementes liegen.

Diese Interpretation trägt der Tatsache Rechnung, dass Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten in der militärischen Realität nicht ausschließlich von der jeweils durch Bewuchs und Welligkeit bestimmten Geländerauigkeit abhängen. Reale Gefechtselemente versuchen (gerade in der Verteidigung) diese Rauigkeit durch eine geeignete Stellungswahl so zu umgehen, dass sie möglichst optimale Sichtmöglichkeiten in ihren jeweils zugewiesenen Beobachtungsbereich besitzen. Dies führt dazu, dass bei der Stellungswahl die Überprüfung der Sichtmöglichkeiten in andere als den befohlenen Beobachtungsbereich nur von sekundärem Interesse ist. Gerade bei der oftmals bevorzugten Wahl einer Stellung an Orts- oder Waldrändern hat dies zur Folge, dass bewusst Sichtmöglichkeiten in andere (rückwärtige) Bereiche beschränkt bzw. ganz unterbunden werden.

Für die gewünschte Bestimmung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten bedeutet dies, dass eine Untersuchung der Sichtverbindungen aller Geländezellen in einem gegebenen Radius um die jeweils betrachtete Stellung kaum sinnvoll ist, da das Ergebnis einer solchen Untersuchung die gesuchte Sichtkontaktwahrscheinlichkeit aus den beschriebenen Gründen zumeist tendenziell unterschätzen würde. Es bietet sich deshalb an, den Anteil der Geländezellen zu bestimmen, für welche gilt:

- (a) Die Geländezellen *befinden sich auf einem Kreisbogen*, der in Abhängigkeit von einer gewählten Geländezelle z_{LOS} definiert wird durch die betrachtete Entfernung d sowie eine vorgegebene Blickrichtung \vec{o}_{LOS} und einen ebenfalls gegebenen Öffnungswinkel ψ_{LOS} (vgl. Abbildung C.0.1)
- (b) *Es besteht eine Sichtverbindung* von z_{LOS} zu diesen Geländezellen.

³⁰⁵ vgl. Kapitel 7.4.1, S. 224ff

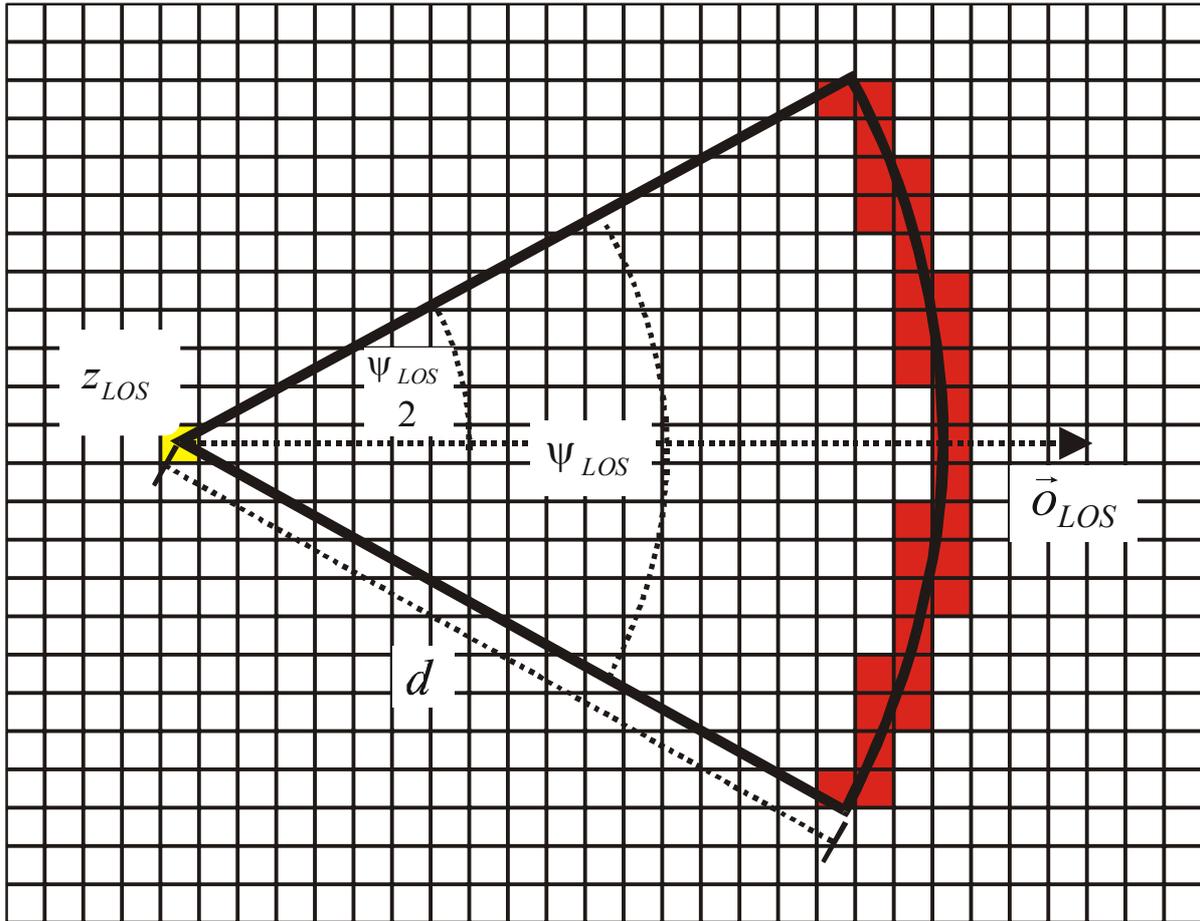


Abbildung C.0.1: Bedeutung der verwendeten Größen (Rote Zellen markieren die zu prüfenden Geländezellen)

Die Sichtkontaktwahrscheinlichkeit $p_{LOS}(d)$ bestimmt sich dann bei gegebenem z_{LOS} , \vec{o}_{LOS} und ψ_{LOS} gemäß:

$$p_{LOS}(d) = \frac{|\tilde{Z}'_{LOS}(z_{LOS}, \vec{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d)|}{|\tilde{Z}(z_{LOS}, \vec{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d)|} \quad (C.1)$$

wobei

- d = Untersuchte Entfernung
- z_{LOS} = Betrachtete Geländezelle
- \vec{o}_{LOS} = Blickrichtung für die Bestimmung von $p_{LOS}(d)$
- ψ_{LOS} = Öffnungswinkel für die Bestimmung von $p_{LOS}(d)$
- $\tilde{Z}(z_{LOS}, \vec{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d)$ = Menge der Zellen auf dem durch d , z_{LOS} , \vec{o}_{LOS} und ψ_{LOS} bestimmten Kreisbogen
- $\tilde{Z}'_{LOS}(z_{LOS}, \vec{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d)$ = Menge der Zellen auf dem durch d , z_{LOS} , \vec{o}_{LOS} und ψ_{LOS} bestimmten Kreisbogen, zu welchen eine Sichtverbindung von z_{LOS} aus besteht

Die oben dargestellte Abbildung zeigt, dass bei der Ermittlung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten eine feinere Abstufung der Entfernung d nicht notwendig eine größere Genauigkeit erbringt, da der jeweilige Maßstab des quadratischen Zellrasters – in Form der Kantenlänge einer Geländezelle – diese Differenzierung nicht unterstützt. Für zu geringe Unterschiede bei zwei gegebenen Entfernungen d_1 und d_2 kann somit der Fall eintreten:

$$\tilde{Z}'(z_{LOS}, \bar{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d_1) \cap \tilde{Z}'(z_{LOS}, \bar{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d_2) \neq \{ \} \quad (C.2)$$

Für die Bestimmung von $p_{LOS}(d)$ in einem gegebenen digitalisierten Gelände reicht es deshalb, die Untersuchungen auf Entfernungen d_i zu beschränken, für welche gilt:

$$\tilde{Z}'(z_{LOS}, \bar{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d_1) \cap \tilde{Z}'(z_{LOS}, \bar{o}_{LOS}, \psi_{LOS}, d_2) = \{ \} \quad \forall i_1, i_2 \quad (C.3)$$

Werden anschließend im Rahmen einer Anwendung Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten für Entfernungen d_j benötigt, welche nicht in der Menge \tilde{D}_{LOS} der explizit untersuchten Entfernungen d_i enthalten sind, so bietet es sich an, denjenigen Wert $p_{LOS}(d_k)$ zu wählen, für den gilt:

$$|d_k - d_j| = \min_i \{ |d_i - d_j| \} \quad (C.4)$$

wobei

$$d_i \in \tilde{D}_{LOS} \wedge d_j \notin \tilde{D}_{LOS} \quad (C.5)$$

Weiterhin erscheint es sinnvoll, die untersuchten Entfernungen auf Distanzen zu beschränken, die mit den im Rahmen des untersuchten Szenars vorhandenen Aufklärungsmitteln, d.h. Sensorsystemen, überbrückt werden können und somit die Entdeckung feindlicher Gefechtselemente zumindest theoretisch erlauben. Sind während der Ermittlung der Sichtkontaktwahrscheinlichkeiten die technischen Daten der im später abgebildeten Gefecht verwendeten Sensorsysteme noch nicht bekannt bzw. werden diese im Rahmen einer Versuchsreihe variiert, so kann alternativ ein theoretisch zu begründender Maximalwert als obere Schranke für die zu untersuchenden Distanzen dienen.

Abschließend bleibt jedoch noch einmal festzuhalten, dass die derart ermittelten Sichtkontaktwahrscheinlichkeit für nur eine untersuchte Stellung (Geländezelle) und die dabei verwendeten Parameter Gültigkeit besitzt. Sie stellt somit kein allgemein gültiges Maß für die Beschaffenheit eines Geländes dar, sondern einzig für einen unter speziellen Voraussetzungen betrachteten Teil davon.

ANHANG D – TABELLARISCHE AUFLISTUNG DER ERGEBNISSE DER VERSUCHSREIHEN I-III

Ergebnisse der Versuchsreihe I

Grundszenar- variante	Gefechtsdauer in [sek]		Rechenzeit in [sek]		Gewinnhäufigkeit in [%]		Endstärke in [Einzelssystemen]	
	EW	StdAbw	EW	StdAbw	Blau	Rot	EW	StdAbw
1-100-25-0	135.32	35.54	0.87	0.15	49.00	51.00	12.27	5.78
1-100-25-25	135.92	40.83	0.86	0.15	52.00	48.00	12.17	5.39
1-100-25-50	136.84	44.15	0.85	0.12	52.00	48.00	12.17	4.97
1-100-25-75	133.80	44.58	0.83	0.14	42.00	58.00	12.93	5.98
1-100-25-100	140.84	43.72	0.85	0.14	44.00	56.00	11.44	5.42
1-100-50-0	90.44	23.75	0.52	0.07	48.00	52.00	11.34	5.05
1-100-50-25	98.12	27.59	0.53	0.06	48.00	52.00	10.58	4.91
1-100-50-50	92.04	27.23	0.51	0.06	55.00	45.00	11.54	5.13
1-100-50-75	93.06	25.68	0.52	0.08	47.00	53.00	10.74	5.30
1-100-50-100	95.54	27.92	0.53	0.08	55.00	45.00	10.61	4.72
1-100-75-0	75.08	21.69	0.42	0.08	51.00	49.00	10.40	4.73
1-100-75-25	74.00	20.42	0.41	0.04	44.00	56.00	10.47	5.26
1-100-75-50	77.06	26.61	0.40	0.04	52.00	48.00	10.71	5.11
1-100-75-75	79.12	24.49	0.41	0.05	45.00	55.00	9.72	5.32
1-100-75-100	73.88	23.69	0.41	0.04	44.00	56.00	11.08	5.33
1-500-25-0	132.11	42.82	1.14	0.16	49.90	50.10	12.21	5.53
1-500-25-25	131.63	38.27	1.14	0.16	53.10	46.90	11.97	5.26
1-500-25-50	131.78	43.04	1.14	0.16	48.10	51.90	12.23	5.43
1-500-25-75	133.48	40.93	1.15	0.16	50.90	49.10	12.09	5.43
1-500-25-100	132.99	41.64	1.14	0.16	50.40	49.60	12.19	5.71
1-500-50-0	85.97	23.88	0.71	0.09	53.10	46.90	11.24	4.93
1-500-50-25	87.91	25.24	0.72	0.10	48.10	51.90	11.08	5.11
1-500-50-50	87.13	25.11	0.71	0.09	49.80	50.20	11.19	5.16
1-500-50-75	87.58	25.32	0.71	0.09	50.80	49.20	11.04	5.23
1-500-50-100	87.42	25.24	0.71	0.10	47.90	52.10	11.22	5.22
1-500-75-0	71.70	19.86	0.56	0.07	51.70	48.30	10.24	5.01
1-500-75-25	71.46	19.62	0.57	0.07	49.50	50.50	10.27	4.82
1-500-75-50	72.22	19.80	0.56	0.07	48.40	51.60	10.16	4.86
1-500-75-75	72.11	19.49	0.56	0.08	51.40	48.60	10.18	4.72
1-500-75-100	71.45	19.11	0.56	0.07	51.20	48.80	10.42	4.98
1-1000-25-0	156.27	63.18	1.26	0.16	50.80	49.20	11.43	5.51
1-1000-25-25	157.54	62.60	1.26	0.16	50.90	49.10	11.36	5.47
1-1000-25-50	155.92	63.88	1.26	0.16	48.50	51.50	11.46	5.57
1-1000-25-75	155.20	61.81	1.25	0.16	49.80	50.20	11.37	5.55
1-1000-25-100	154.98	63.20	1.25	0.17	51.70	48.30	11.54	5.45
1-1000-50-0	102.32	38.03	0.79	0.10	50.20	49.80	9.92	5.07
1-1000-50-25	100.87	35.76	0.79	0.09	50.30	49.70	9.98	5.05
1-1000-50-50	100.21	35.73	0.78	0.09	52.70	47.30	10.17	5.22
1-1000-50-75	101.02	36.15	0.78	0.09	51.30	48.70	10.02	4.96
1-1000-50-100	100.67	36.15	0.79	0.09	51.30	48.70	10.23	5.12

1-1000-75-0	81.69	26.24	0.62	0.07	48.60	51.40	9.39	4.78
1-1000-75-25	82.24	27.70	0.62	0.06	50.00	50.00	9.17	4.65
1-1000-75-50	79.82	27.31	0.62	0.07	47.80	52.20	9.36	4.69
1-1000-75-75	82.73	27.85	0.63	0.07	53.40	46.60	8.98	4.70
1-1000-75-100	81.49	26.04	0.62	0.07	49.30	50.70	9.05	4.71
2-100-25-0	137.15	41.04	0.51	0.10	49.90	50.10	11.17	4.93
2-100-25-25	137.47	39.12	0.52	0.10	49.40	50.60	11.16	4.83
2-100-25-50	138.93	39.97	0.52	0.11	49.50	50.50	11.23	4.87
2-100-25-75	132.21	36.69	0.47	0.10	49.60	50.40	11.51	4.93
2-100-25-100	132.10	38.06	0.47	0.10	48.70	51.30	11.93	4.99
2-100-50-0	90.27	23.24	0.30	0.05	49.90	50.10	10.17	4.32
2-100-50-25	91.99	23.82	0.31	0.08	48.50	51.50	9.79	4.33
2-100-50-50	89.13	23.88	0.31	0.06	48.00	52.00	10.34	4.42
2-100-50-75	86.50	23.04	0.27	0.06	51.90	48.10	10.74	4.74
2-100-50-100	87.47	24.98	0.27	0.06	48.60	51.40	10.51	4.76
2-100-75-0	73.04	19.83	0.22	0.05	50.50	49.50	9.80	4.32
2-100-75-25	72.26	19.35	0.23	0.05	52.70	47.30	9.70	4.32
2-100-75-50	72.28	18.70	0.22	0.05	50.30	49.70	9.92	4.21
2-100-75-75	69.48	18.87	0.19	0.04	51.10	48.90	10.08	4.58
2-100-75-100	68.98	18.70	0.19	0.04	50.20	49.80	10.19	4.58
2-500-25-0	135.30	36.71	0.74	0.12	50.60	49.40	11.22	4.82
2-500-25-25	133.92	36.62	0.73	0.12	50.40	49.60	11.49	4.91
2-500-25-50	136.30	36.00	0.74	0.13	48.50	51.50	11.01	4.74
2-500-25-75	128.44	35.16	0.67	0.13	51.50	48.50	11.85	4.94
2-500-25-100	132.43	37.73	0.69	0.13	47.70	52.30	11.44	5.01
2-500-50-0	88.87	22.23	0.44	0.07	51.10	48.90	10.15	4.32
2-500-50-25	88.76	21.61	0.44	0.07	50.60	49.40	10.35	4.53
2-500-50-50	90.95	23.21	0.44	0.08	50.10	49.90	9.99	4.49
2-500-50-75	86.11	22.36	0.38	0.07	49.30	50.70	10.40	4.76
2-500-50-100	85.82	23.54	0.38	0.07	48.50	51.50	10.58	4.66
2-500-75-0	73.82	18.98	0.33	0.06	49.70	50.30	9.27	4.23
2-500-75-25	73.84	19.20	0.33	0.06	49.80	50.20	9.17	4.18
2-500-75-50	73.46	18.13	0.33	0.05	49.90	50.10	9.34	4.07
2-500-75-75	69.78	18.91	0.28	0.05	51.30	48.70	9.85	4.79
2-500-75-100	69.66	17.86	0.27	0.04	52.20	47.80	9.71	4.46
2-1000-25-0	142.33	46.01	0.69	0.11	51.10	48.90	11.07	5.04
2-1000-25-25	139.87	46.52	0.73	0.12	53.20	46.80	11.12	4.94
2-1000-25-50	140.93	43.24	0.69	0.11	52.40	47.60	11.02	4.97
2-1000-25-75	135.26	43.39	0.66	0.11	53.60	46.40	11.54	5.14
2-1000-25-100	141.10	45.41	0.66	0.10	50.70	49.30	10.96	5.13
2-1000-50-0	93.72	29.06	0.42	0.06	45.70	54.30	9.36	4.58
2-1000-50-25	93.84	27.44	0.42	0.06	49.30	50.70	9.35	4.65
2-1000-50-50	92.34	26.61	0.42	0.05	51.90	48.10	9.66	4.56
2-1000-50-75	90.49	26.22	0.38	0.06	51.40	48.60	9.99	4.82
2-1000-50-100	89.08	26.35	0.38	0.06	47.70	52.30	9.98	4.65
2-1000-75-0	75.85	21.85	0.33	0.05	49.80	50.20	8.67	4.31
2-1000-75-25	76.12	21.01	0.33	0.04	49.90	50.10	8.63	4.46
2-1000-75-50	75.59	20.02	0.33	0.04	52.20	47.80	8.62	4.31
2-1000-75-75	74.22	23.10	0.29	0.04	51.30	48.70	8.95	4.70
2-1000-75-100	73.60	22.47	0.29	0.04	51.40	48.60	8.99	4.56
3-100-25-0	137.55	34.97	0.23	0.04	50.70	49.30	10.45	4.63

3-100-25-25	138.99	37.41	0.26	0.07	49.80	50.20	10.32	4.64
3-100-25-50	138.15	39.38	0.23	0.05	48.90	51.10	10.62	4.79
3-100-25-75	133.55	34.95	0.22	0.05	48.90	51.10	10.73	4.65
3-100-25-100	129.67	33.81	0.21	0.05	52.50	47.50	11.27	4.76
3-100-50-0	92.40	23.44	0.14	0.03	49.80	50.20	8.74	3.98
3-100-50-25	90.58	22.41	0.14	0.03	48.70	51.30	9.13	4.03
3-100-50-50	90.74	21.94	0.14	0.02	53.30	46.70	9.05	4.15
3-100-50-75	87.21	21.82	0.13	0.02	49.00	51.00	9.48	4.29
3-100-50-100	85.72	21.43	0.13	0.03	48.90	51.10	9.34	4.27
3-100-75-0	74.04	17.51	0.11	0.02	52.80	47.20	7.87	3.64
3-100-75-25	74.57	18.91	0.11	0.03	52.50	47.50	7.91	3.77
3-100-75-50	72.92	17.99	0.11	0.02	48.20	51.80	8.01	3.77
3-100-75-75	69.84	18.25	0.10	0.02	48.00	52.00	8.53	3.95
3-100-75-100	66.19	17.31	0.09	0.02	49.20	50.80	8.99	4.32
3-500-25-0	138.50	34.86	0.35	0.06	50.20	49.80	10.34	4.49
3-500-25-25	139.32	36.85	0.37	0.07	49.40	50.60	10.31	4.56
3-500-25-50	136.37	35.66	0.34	0.06	49.90	50.10	10.53	4.65
3-500-25-75	134.46	33.77	0.34	0.06	52.90	47.10	10.75	4.65
3-500-25-100	129.69	34.15	0.32	0.06	49.30	50.70	11.07	4.76
3-500-50-0	92.02	22.11	0.22	0.03	51.50	48.50	8.84	4.02
3-500-50-25	92.07	22.50	0.22	0.04	50.40	49.60	8.79	4.05
3-500-50-50	90.01	21.94	0.21	0.04	51.10	48.90	9.15	4.23
3-500-50-75	87.58	22.32	0.20	0.04	49.60	50.40	9.51	4.19
3-500-50-100	84.57	20.98	0.19	0.04	50.90	49.10	9.66	4.32
3-500-75-0	74.62	17.41	0.17	0.03	49.10	50.90	7.73	3.66
3-500-75-25	74.61	18.07	0.17	0.04	51.30	48.70	8.03	3.73
3-500-75-50	72.52	18.34	0.16	0.04	50.50	49.50	8.29	3.92
3-500-75-75	70.37	17.67	0.15	0.03	46.80	53.20	8.24	3.87
3-500-75-100	67.78	18.29	0.14	0.03	49.40	50.60	8.92	4.28
3-1000-25-0	138.06	37.45	0.35	0.07	48.70	51.30	10.40	4.67
3-1000-25-25	138.36	38.19	0.35	0.07	48.80	51.20	10.27	4.67
3-1000-25-50	137.86	40.61	0.34	0.06	51.60	48.40	10.61	4.93
3-1000-25-75	134.09	40.26	0.33	0.06	51.70	48.30	10.86	4.95
3-1000-25-100	130.67	37.78	0.32	0.07	52.40	47.60	11.14	4.77
3-1000-50-0	92.03	24.89	0.22	0.04	49.50	50.50	8.85	4.23
3-1000-50-25	92.02	24.07	0.22	0.04	46.80	53.20	8.60	4.20
3-1000-50-50	88.59	23.44	0.21	0.03	49.10	50.90	9.33	4.35
3-1000-50-75	86.99	24.01	0.20	0.04	49.50	50.50	9.39	4.38
3-1000-50-100	86.91	22.64	0.19	0.04	50.50	49.50	9.28	4.33
3-1000-75-0	74.41	18.05	0.17	0.02	49.10	50.90	7.88	3.98
3-1000-75-25	74.74	19.06	0.17	0.02	50.50	49.50	7.85	3.90
3-1000-75-50	73.15	18.84	0.16	0.03	50.50	49.50	8.19	4.10
3-1000-75-75	71.89	18.50	0.16	0.03	46.30	53.70	8.14	4.16
3-1000-75-100	69.56	18.84	0.15	0.02	52.20	47.80	8.58	4.27
4-100-25-0	138.17	37.99	0.11	0.02	51.30	48.70	9.94	4.72
4-100-25-25	137.30	36.26	0.11	0.02	50.40	49.60	10.13	4.64
4-100-25-50	134.90	36.49	0.11	0.03	49.40	50.60	10.49	4.84
4-100-25-75	130.98	33.90	0.10	0.03	50.20	49.80	10.54	4.70
4-100-25-100	128.84	34.02	0.10	0.03	49.30	50.70	10.70	4.88
4-100-50-0	89.41	22.74	0.07	0.03	50.90	49.10	8.49	4.23
4-100-50-25	89.99	21.86	0.07	0.03	46.30	53.70	8.28	4.19

4-100-50-50	86.21	21.39	0.06	0.01	51.90	48.10	8.79	4.27
4-100-50-75	85.16	22.72	0.06	0.01	49.50	50.50	8.89	4.48
4-100-50-100	81.46	21.71	0.06	0.01	53.40	46.60	9.20	4.53
4-100-75-0	71.43	15.78	0.05	0.01	49.70	50.30	7.16	3.66
4-100-75-25	71.14	17.20	0.05	0.01	50.10	49.90	7.37	3.69
4-100-75-50	68.75	17.26	0.05	0.01	52.20	47.80	7.67	3.95
4-100-75-75	66.99	16.78	0.05	0.01	52.70	47.30	7.68	3.84
4-100-75-100	63.18	15.80	0.04	0.01	50.00	50.00	8.30	4.31
4-500-25-0	137.70	36.72	0.16	0.04	46.00	54.00	10.05	4.61
4-500-25-25	134.84	33.69	0.16	0.04	49.60	50.40	10.31	4.63
4-500-25-50	133.14	36.44	0.16	0.04	49.90	50.10	10.34	4.78
4-500-25-75	129.96	35.66	0.15	0.04	48.90	51.10	10.77	4.93
4-500-25-100	128.53	35.08	0.15	0.03	52.00	48.00	10.81	5.01
4-500-50-0	89.57	21.88	0.10	0.02	47.30	52.70	8.52	4.15
4-500-50-25	89.45	22.48	0.10	0.02	51.20	48.80	8.37	4.18
4-500-50-50	85.97	20.87	0.10	0.02	49.90	50.10	8.89	4.34
4-500-50-75	83.57	19.95	0.09	0.02	49.30	50.70	9.10	4.36
4-500-50-100	81.19	21.22	0.09	0.03	48.40	51.60	9.54	4.68
4-500-75-0	72.17	17.35	0.08	0.02	48.20	51.80	7.14	3.73
4-500-75-25	70.41	16.28	0.08	0.01	48.20	51.80	7.40	3.83
4-500-75-50	68.92	18.14	0.07	0.01	47.80	52.20	7.87	4.02
4-500-75-75	65.87	16.31	0.07	0.01	50.90	49.10	8.06	3.98
4-500-75-100	62.35	15.53	0.06	0.01	52.10	47.90	8.38	4.29
4-1000-25-0	135.94	36.85	0.16	0.04	51.60	48.40	10.28	4.74
4-1000-25-25	137.46	36.94	0.16	0.03	51.90	48.10	10.13	4.61
4-1000-25-50	133.28	36.02	0.16	0.03	50.00	50.00	10.50	4.88
4-1000-25-75	130.14	34.17	0.16	0.04	50.60	49.40	10.69	4.81
4-1000-25-100	127.55	34.76	0.15	0.03	49.80	50.20	10.76	4.95
4-1000-50-0	89.26	21.62	0.10	0.02	52.10	47.90	8.66	4.32
4-1000-50-25	89.90	23.48	0.10	0.02	50.30	49.70	8.45	4.28
4-1000-50-50	86.54	21.72	0.10	0.03	48.90	51.10	8.85	4.36
4-1000-50-75	85.05	22.15	0.10	0.03	50.80	49.20	9.00	4.48
4-1000-50-100	82.18	21.62	0.09	0.03	48.80	51.20	9.41	4.71
4-1000-75-0	72.04	16.93	0.08	0.01	51.00	49.00	7.48	3.91
4-1000-75-25	72.18	18.32	0.08	0.01	51.30	48.70	7.65	4.03
4-1000-75-50	68.53	15.80	0.08	0.01	49.10	50.90	8.24	4.13
4-1000-75-75	67.24	16.42	0.07	0.01	49.50	50.50	8.46	4.42
4-1000-75-100	65.19	17.00	0.07	0.01	49.30	50.70	8.66	4.57
5-100-25-50	124.63	34.29	0.05	0.03	49.20	50.80	10.84	4.98
5-100-25-75	117.72	33.18	0.05	0.01	49.20	50.80	11.71	5.30
5-100-25-100	119.45	35.88	0.05	0.01	51.40	48.60	11.40	5.31
5-100-50-0	80.97	20.24	0.03	0.01	51.80	48.20	9.08	4.57
5-100-50-25	80.09	20.83	0.03	0.01	49.50	50.50	9.04	4.72
5-100-50-50	77.70	19.72	0.04	0.01	50.00	50.00	9.45	4.74
5-100-50-75	75.26	21.02	0.03	0.01	47.70	52.30	9.78	4.94
5-100-50-100	72.88	20.30	0.03	0.01	52.60	47.40	10.02	5.17
5-100-75-0	63.91	15.71	0.03	0.01	48.80	51.20	7.98	4.33
5-100-75-25	63.16	14.85	0.03	0.01	49.80	50.20	8.09	4.37
5-100-75-50	61.49	15.89	0.03	0.01	49.00	51.00	8.35	4.49
5-100-75-75	59.30	16.42	0.03	0.01	50.20	49.80	8.53	4.72
5-100-75-100	57.14	15.38	0.02	0.01	49.00	51.00	8.56	5.28

5-500-25-0	128.23	34.12	0.08	0.01	51.00	49.00	10.59	4.83
5-500-25-25	128.68	36.54	0.08	0.01	50.00	50.00	10.68	5.03
5-500-25-50	126.48	36.59	0.08	0.01	51.40	48.60	10.70	5.10
5-500-25-75	121.41	34.61	0.08	0.01	51.30	48.70	11.20	5.09
5-500-25-100	114.88	31.96	0.07	0.01	51.40	48.60	11.78	5.28
5-500-50-0	81.81	20.96	0.05	0.01	51.90	48.10	8.87	4.68
5-500-50-25	81.45	21.07	0.05	0.02	49.50	50.50	9.02	4.79
5-500-50-50	77.52	20.38	0.05	0.02	50.10	49.90	9.43	4.74
5-500-50-75	74.71	19.11	0.05	0.01	50.90	49.10	9.73	4.82
5-500-50-100	73.20	19.32	0.04	0.01	49.20	50.80	9.65	4.90
5-500-75-0	64.02	15.83	0.04	0.01	51.40	48.60	7.90	4.37
5-500-75-25	64.95	17.01	0.04	0.01	51.30	48.70	7.78	4.49
5-500-75-50	62.02	15.81	0.04	0.01	49.30	50.70	8.21	4.62
5-500-75-75	59.47	15.60	0.04	0.01	50.00	50.00	8.54	4.64
5-500-75-100	57.25	16.02	0.03	0.01	51.20	48.80	8.39	4.99
5-1000-25-0	127.40	34.27	0.09	0.01	50.70	49.30	10.79	4.87
5-1000-25-25	128.10	35.26	0.09	0.02	50.50	49.50	10.57	5.05
5-1000-25-50	122.16	35.22	0.09	0.02	48.20	51.80	11.13	5.15
5-1000-25-75	121.69	36.05	0.09	0.02	49.20	50.80	11.20	5.27
5-1000-25-100	119.52	33.47	0.09	0.03	49.80	50.20	11.19	5.09
5-1000-50-0	81.36	20.52	0.06	0.02	48.00	52.00	9.20	4.85
5-1000-50-25	81.67	20.19	0.06	0.02	50.60	49.40	9.10	4.68
5-1000-50-50	78.63	20.40	0.06	0.02	48.70	51.30	9.48	4.81
5-1000-50-75	75.54	19.89	0.06	0.01	48.20	51.80	9.88	4.87
5-1000-50-100	73.71	19.65	0.05	0.01	51.80	48.20	9.96	5.03
5-1000-75-0	65.09	16.16	0.05	0.02	48.90	51.10	8.21	4.49
5-1000-75-25	63.82	14.60	0.05	0.01	49.40	50.60	8.24	4.31
5-1000-75-50	61.78	16.02	0.04	0.01	46.20	53.80	8.73	4.76
5-1000-75-75	58.79	14.54	0.04	0.02	51.10	48.90	9.15	4.77
5-1000-75-100	56.02	14.84	0.04	0.01	49.30	50.70	9.82	5.22
6-100-25-50	108.10	32.05	0.03	0.01	50.90	49.10	12.43	5.45
6-100-25-75	102.87	30.44	0.03	0.01	47.00	53.00	12.96	5.60
6-100-25-100	104.39	31.50	0.03	0.01	47.90	52.10	12.64	5.79
6-100-50-0	70.77	20.83	0.02	0.00	49.50	50.50	10.39	5.55
6-100-50-25	68.95	18.81	0.02	0.01	47.30	52.70	10.75	5.76
6-100-50-50	65.40	17.40	0.02	0.00	49.80	50.20	11.30	5.67
6-100-50-75	63.54	18.89	0.02	0.00	49.90	50.10	11.37	5.88
6-100-50-100	61.27	17.04	0.02	0.00	51.20	48.80	11.30	5.85
6-100-75-0	56.01	15.41	0.02	0.00	49.50	50.50	9.19	5.81
6-100-75-25	54.53	14.96	0.02	0.00	50.90	49.10	9.50	5.97
6-100-75-50	51.44	13.66	0.02	0.00	50.60	49.40	9.92	6.07
6-100-75-75	49.90	13.53	0.02	0.00	51.40	48.60	10.06	6.10
6-100-75-100	49.21	14.78	0.01	0.00	47.80	52.20	9.73	6.97
6-500-25-0	113.82	34.43	0.04	0.02	49.00	51.00	12.02	5.58
6-500-25-25	111.48	33.59	0.04	0.01	47.90	52.10	12.04	5.59
6-500-25-50	109.49	33.57	0.04	0.01	49.50	50.50	12.14	5.52
6-500-25-75	104.67	29.60	0.04	0.01	50.80	49.20	12.65	5.45
6-500-25-100	102.76	34.61	0.04	0.01	47.90	52.10	12.72	5.82
6-500-50-0	70.31	19.35	0.03	0.01	47.60	52.40	10.65	5.54
6-500-50-25	69.12	18.37	0.03	0.01	50.10	49.90	10.36	5.46
6-500-50-50	65.18	17.92	0.03	0.01	49.10	50.90	11.37	5.62

6-500-50-75	62.77	16.61	0.03	0.01	50.50	49.50	11.33	5.70
6-500-50-100	61.72	17.95	0.02	0.00	50.40	49.60	11.37	6.06
6-500-75-0	55.33	15.14	0.02	0.00	46.90	53.10	9.18	5.63
6-500-75-25	54.44	14.75	0.02	0.01	49.50	50.50	9.46	5.79
6-500-75-50	52.57	14.74	0.02	0.01	49.40	50.60	9.86	6.24
6-500-75-75	49.87	14.42	0.02	0.00	46.70	53.30	10.00	6.21
6-500-75-100	49.56	14.90	0.02	0.00	49.10	50.90	9.46	6.91
6-1000-25-0	112.57	33.57	0.05	0.02	49.10	50.90	12.17	5.50
6-1000-25-25	112.11	31.99	0.05	0.01	48.70	51.30	11.99	5.43
6-1000-25-50	109.65	32.74	0.05	0.01	52.00	48.00	12.07	5.38
6-1000-25-75	105.60	30.88	0.05	0.01	48.00	52.00	12.47	5.59
6-1000-25-100	103.98	31.91	0.05	0.01	51.10	48.90	12.60	5.43
6-1000-50-0	69.89	19.71	0.03	0.01	46.00	54.00	10.56	5.48
6-1000-50-25	68.64	19.48	0.03	0.01	47.70	52.30	10.74	5.67
6-1000-50-50	66.35	18.43	0.03	0.01	47.50	52.50	10.83	5.62
6-1000-50-75	63.63	18.54	0.03	0.00	49.40	50.60	11.24	5.86
6-1000-50-100	61.97	18.34	0.03	0.00	51.80	48.20	11.30	5.89
6-1000-75-0	55.43	14.77	0.03	0.01	49.50	50.50	9.41	5.76
6-1000-75-25	54.22	14.22	0.03	0.01	51.10	48.90	9.29	5.69
6-1000-75-50	52.55	14.51	0.03	0.00	52.30	47.70	9.71	6.10
6-1000-75-75	50.02	13.84	0.03	0.00	50.10	49.90	9.64	6.10
6-1000-75-100	49.17	14.42	0.02	0.00	50.10	49.90	9.72	6.86

Ergebnisse der Versuchsreihe II

Grundszenar- variante	Gefechtsdauer in [sek]		Rechenzeit in [sek]		Gewinnhäufigkeit in [%]		Endstärke in [Einzelsystemen]	
	EW	StdAbw	EW	StdAbw	Blau	Rot	EW	StdAbw
1/2-100-25-0	131.62	34.61	0.68	0.11	27.85	72.15	12.14	5.22
1/3-100-25-0	136.34	31.36	0.47	0.09	38.08	61.92	10.98	4.80
1/4-100-25-0	134.32	31.82	0.36	0.06	81.71	18.29	12.08	5.02
1/5-100-25-0	107.06	22.25	0.28	0.05	100.00	0.00	19.85	3.18
1/6-100-25-0	93.85	17.57	0.23	0.04	100.00	0.00	25.42	1.66
1/2-500-25-0	128.63	33.33	0.91	0.16	33.30	66.70	12.07	5.15
1/3-500-25-0	133.03	32.75	0.68	0.13	51.77	48.23	10.97	4.83
1/4-500-25-0	126.85	31.38	0.53	0.10	88.43	11.57	13.16	4.99
1/5-500-25-0	105.50	23.11	0.43	0.06	100.00	0.00	20.21	3.21
1/6-500-25-0	95.79	18.78	0.37	0.08	100.00	0.00	25.31	1.56
1/2-1000-25-0	138.72	36.07	0.95	0.12	42.47	57.53	11.53	5.08
1/3-1000-25-0	143.07	34.66	0.70	0.10	52.48	47.52	10.69	4.95
1/4-1000-25-0	139.35	34.81	0.56	0.07	88.61	11.39	12.93	5.21
1/5-1000-25-0	115.43	26.08	0.47	0.06	100.00	0.00	19.72	3.23
1/6-1000-25-0	103.63	20.90	0.39	0.06	100.00	0.00	24.99	1.70
2/3-100-25-0	138.06	31.62	0.39	0.13	47.94	52.06	10.75	4.58
2/4-100-25-0	136.85	32.22	0.26	0.11	70.30	29.70	10.97	4.72
2/5-100-25-0	118.72	29.73	0.19	0.03	96.08	3.92	14.95	4.98
2/6-100-25-0	98.47	19.33	0.14	0.02	100.00	0.00	21.62	2.91
2/3-500-25-0	134.71	31.93	0.56	0.17	54.88	45.12	10.81	4.70
2/4-500-25-0	133.10	33.33	0.39	0.11	74.80	25.20	11.45	5.03
2/5-500-25-0	117.89	29.01	0.28	0.10	96.69	3.31	15.33	4.86
2/6-500-25-0	99.06	19.36	0.21	0.03	100.00	0.00	21.63	2.89
2/3-1000-25-0	135.94	33.46	0.54	0.09	60.42	39.58	11.08	5.03
2/4-1000-25-0	136.42	33.11	0.40	0.14	74.20	25.80	11.37	4.89
2/5-1000-25-0	122.62	31.92	0.30	0.05	96.49	3.51	15.20	4.97
2/6-1000-25-0	104.16	21.18	0.23	0.03	100.00	0.00	21.38	2.95
3/4-100-25-0	136.92	30.87	0.17	0.03	56.97	43.03	10.27	4.64
3/5-100-25-0	132.38	32.19	0.13	0.02	77.80	22.20	11.24	4.91
3/6-100-25-0	112.05	29.35	0.09	0.02	95.90	4.10	15.70	5.05
3/4-500-25-0	135.83	31.26	0.26	0.11	57.85	42.15	10.35	4.59
3/5-500-25-0	130.01	31.24	0.19	0.03	78.44	21.56	11.40	4.97
3/6-500-25-0	113.93	30.44	0.14	0.02	95.39	4.61	15.46	5.28
3/4-1000-25-0	136.37	31.96	0.27	0.05	60.49	39.51	10.42	4.85
3/5-1000-25-0	131.67	33.34	0.21	0.03	78.85	21.15	11.31	5.06
3/6-1000-25-0	115.52	30.50	0.15	0.03	95.28	4.72	15.43	5.20
4/5-100-25-0	132.31	30.61	0.08	0.01	61.37	38.63	10.41	4.70
4/6-100-25-0	124.18	33.26	0.06	0.01	79.58	20.42	11.83	5.32
4/5-500-25-0	131.99	31.83	0.12	0.02	64.62	35.38	10.47	4.80
4/6-500-25-0	125.28	33.66	0.09	0.02	75.96	24.04	11.86	5.34
4/5-1000-25-0	134.29	32.91	0.13	0.02	62.73	37.27	10.24	4.99
4/6-1000-25-0	125.43	33.71	0.10	0.02	78.69	21.31	11.97	5.42

5/6-100-25-0	120.73	31.00	0.04	0.01	61.04	38.96	11.28	5.13
5/6-500-25-0	121.27	32.05	0.06	0.01	59.23	40.77	11.42	5.23
5/6-1000-25-0	121.39	31.64	0.08	0.01	59.05	40.95	11.25	5.12
1/3-100-50-0	94.55	23.19	0.32	0.17	46.20	53.80	8.90	4.15
1/4-100-50-0	79.27	18.46	0.25	0.13	99.60	0.40	15.85	4.07
1/5-100-50-0	68.74	14.24	0.20	0.16	100.00	0.00	23.46	1.89
1/6-100-50-0	63.73	14.35	0.16	0.03	100.00	0.00	27.51	1.11
1/2-500-50-0	84.11	22.92	0.58	0.36	27.50	72.50	11.43	4.90
1/3-500-50-0	89.76	22.78	0.45	0.14	69.14	30.86	9.59	4.51
1/4-500-50-0	73.78	16.62	0.35	0.17	100.00	0.00	17.49	3.48
1/5-500-50-0	68.20	14.62	0.29	0.09	100.00	0.00	23.74	1.81
1/6-500-50-0	63.98	13.57	0.24	0.12	100.00	0.00	27.49	1.09
1/2-1000-50-0	97.49	30.93	0.61	0.13	48.63	51.37	9.49	4.79
1/3-1000-50-0	97.59	27.88	0.47	0.11	70.52	29.48	9.39	4.74
1/4-1000-50-0	78.85	19.44	0.37	0.12	99.40	0.60	17.18	3.54
1/5-1000-50-0	72.15	17.66	0.31	0.11	100.00	0.00	23.39	1.92
1/6-1000-50-0	69.01	15.45	0.26	0.04	100.00	0.00	27.14	1.19
2/3-100-50-0	93.06	23.05	0.23	0.09	52.50	47.50	9.28	4.22
2/4-100-50-0	90.35	24.44	0.16	0.09	83.58	16.42	10.58	4.81
2/5-100-50-0	71.79	15.75	0.11	0.01	99.60	0.40	18.57	3.42
2/6-100-50-0	62.95	12.73	0.09	0.01	100.00	0.00	24.44	1.88
2/3-500-50-0	92.04	22.64	0.34	0.12	59.20	40.80	9.36	4.14
2/4-500-50-0	84.68	21.31	0.23	0.08	88.50	11.50	11.53	4.74
2/5-500-50-0	70.21	14.74	0.17	0.02	100.00	0.00	18.88	3.26
2/6-500-50-0	63.77	12.49	0.13	0.02	100.00	0.00	24.39	1.94
2/3-1000-50-0	91.84	24.80	0.34	0.10	70.40	29.60	9.86	4.57
2/4-1000-50-0	86.44	23.64	0.24	0.04	90.60	9.40	11.67	4.70
2/5-1000-50-0	72.12	15.94	0.18	0.02	100.00	0.00	18.63	3.48
2/6-1000-50-0	66.95	13.99	0.15	0.02	100.00	0.00	24.10	1.99
3/4-100-50-0	91.61	23.00	0.11	0.03	62.96	37.04	8.74	4.13
3/5-100-50-0	82.20	22.27	0.08	0.01	88.60	11.40	11.55	4.92
3/6-100-50-0	66.97	15.23	0.05	0.01	99.70	0.30	18.86	3.85
3/4-500-50-0	92.13	22.10	0.17	0.02	62.30	37.70	8.65	4.06
3/5-500-50-0	81.92	20.30	0.12	0.02	92.19	7.81	11.52	4.72
3/6-500-50-0	65.77	13.22	0.08	0.01	99.90	0.10	19.03	3.72
3/4-1000-50-0	89.37	22.70	0.16	0.02	73.07	26.93	9.19	4.32
3/5-1000-50-0	81.31	20.90	0.12	0.02	91.10	8.90	11.98	4.89
3/6-1000-50-0	68.26	14.35	0.09	0.01	99.90	0.10	18.53	3.81
4/5-100-50-0	84.83	20.95	0.05	0.01	69.00	31.00	9.10	4.62
4/6-100-50-0	72.98	18.45	0.04	0.01	91.60	8.40	12.86	5.14
4/5-500-50-0	84.68	21.21	0.08	0.01	65.77	34.23	9.12	4.37
4/6-500-50-0	75.30	20.54	0.06	0.01	90.20	9.80	12.63	5.43
4/5-1000-50-0	86.58	21.45	0.08	0.01	68.30	31.70	8.86	4.57
4/6-1000-50-0	75.13	20.66	0.06	0.01	89.80	10.20	12.63	5.33
5/6-100-50-0	76.44	20.63	0.03	0.00	67.20	32.80	10.42	5.34
5/6-500-50-0	77.16	21.63	0.04	0.01	68.10	31.90	10.20	5.36
5/6-1000-50-0	75.56	19.96	0.05	0.01	69.20	30.80	10.21	5.21
1/2-100-75-0	68.90	19.02	0.33	0.23	12.80	87.20	11.39	4.53
1/3-100-75-0	78.14	18.83	0.27	0.16	64.00	36.00	8.44	4.10
1/4-100-75-0	63.66	14.38	0.21	0.13	100.00	0.00	18.49	3.01
1/5-100-75-0	57.43	12.56	0.16	0.08	100.00	0.00	24.87	1.60

1/6-100-75-0	53.86	12.61	0.13	0.09	100.00	0.00	28.15	1.02
1/2-500-75-0	69.49	18.71	0.45	0.14	26.10	73.90	10.26	4.68
1/3-500-75-0	70.01	18.39	0.36	0.10	86.40	13.60	10.74	4.56
1/4-500-75-0	60.37	14.21	0.29	0.15	100.00	0.00	19.80	2.55
1/5-500-75-0	56.17	13.10	0.25	0.09	100.00	0.00	25.12	1.57
1/6-500-75-0	54.98	12.69	0.20	0.10	100.00	0.00	28.07	1.02
1/2-1000-75-0	78.46	24.96	0.48	0.05	53.51	46.49	8.84	4.48
1/3-1000-75-0	74.85	22.27	0.38	0.04	91.29	8.71	11.31	4.72
1/4-1000-75-0	62.98	15.93	0.31	0.15	100.00	0.00	19.76	2.71
1/5-1000-75-0	60.50	15.27	0.26	0.08	100.00	0.00	24.84	1.69
1/6-1000-75-0	58.90	14.68	0.22	0.04	100.00	0.00	27.78	1.14
2/3-100-75-0	75.80	17.88	0.18	0.09	52.20	47.80	8.31	3.80
2/4-100-75-0	69.27	16.83	0.13	0.08	92.90	7.10	11.96	4.54
2/5-100-75-0	56.82	12.19	0.09	0.01	100.00	0.00	20.35	2.79
2/6-100-75-0	53.54	10.99	0.07	0.01	100.00	0.00	25.40	1.64
2/3-500-75-0	75.50	18.24	0.26	0.11	60.80	39.20	8.53	4.04
2/4-500-75-0	66.82	16.53	0.18	0.07	94.60	5.40	12.65	4.63
2/5-500-75-0	56.38	11.62	0.14	0.02	100.00	0.00	20.62	2.61
2/6-500-75-0	52.55	11.25	0.11	0.01	100.00	0.00	25.49	1.66
2/3-1000-75-0	73.48	19.48	0.27	0.05	71.40	28.60	9.31	4.53
2/4-1000-75-0	66.87	16.94	0.19	0.08	96.60	3.40	12.71	4.33
2/5-1000-75-0	56.66	12.72	0.14	0.02	100.00	0.00	20.21	2.73
2/6-1000-75-0	53.33	10.82	0.12	0.01	100.00	0.00	25.10	1.72
3/4-100-75-0	72.87	17.50	0.08	0.01	65.50	34.50	8.02	3.83
3/5-100-75-0	63.37	15.32	0.06	0.01	94.40	5.60	12.51	4.75
3/6-100-75-0	53.04	10.79	0.04	0.01	100.00	0.00	20.48	3.15
3/4-500-75-0	73.36	18.27	0.13	0.02	65.60	34.40	8.00	3.94
3/5-500-75-0	62.47	15.86	0.08	0.01	95.70	4.30	12.87	4.80
3/6-500-75-0	51.75	10.14	0.06	0.01	100.00	0.00	20.63	3.12
3/4-1000-75-0	72.38	18.00	0.13	0.02	77.10	22.90	8.55	4.12
3/5-1000-75-0	63.30	16.07	0.09	0.01	94.70	5.30	12.20	4.60
3/6-1000-75-0	53.28	10.07	0.07	0.01	100.00	0.00	20.16	3.20
4/5-100-75-0	67.77	17.08	0.04	0.01	71.10	28.90	8.44	4.24
4/6-100-75-0	57.06	13.95	0.03	0.00	94.50	5.50	13.64	5.22
4/5-500-75-0	68.19	16.98	0.06	0.01	74.10	25.90	8.39	4.38
4/6-500-75-0	56.63	14.70	0.04	0.01	95.80	4.20	13.96	5.33
4/5-1000-75-0	68.81	17.01	0.07	0.01	71.60	28.40	8.20	4.35
4/6-1000-75-0	58.36	15.08	0.05	0.01	95.10	4.90	13.23	5.23
5/6-100-75-0	59.31	16.06	0.02	0.00	73.50	26.50	9.89	5.37
5/6-500-75-0	59.16	15.49	0.03	0.00	75.90	24.10	9.70	5.18
5/6-1000-75-0	59.95	16.09	0.04	0.01	73.30	26.70	9.53	5.15

Mit Modifizierter Zielauswahlvorschrift

1/2-100-75-0	74.18	20.79	0.30	0.04	51.20	48.80	8.84	4.40
1/3-100-75-0	68.52	19.18	0.23	0.04	95.20	4.80	12.40	4.57
1/4-100-75-0	57.62	13.50	0.18	0.03	100.00	0.00	20.45	2.41
1/5-100-75-0	55.47	13.28	0.15	0.03	100.00	0.00	25.34	1.48
1/6-100-75-0	54.07	13.15	0.13	0.02	100.00	0.00	28.18	0.98

Ergebnisse der Versuchsreihe III

Grundszenar- variante	Gefechtsdauer in [sek]		Rechenzeit in [sek]		Gewinnhäufigkeit in [%]		Endstärke in [Einzelsystemen]	
	EW	StdAbw	EW	StdAbw	Blau	Rot	EW	StdAbw
1-100-75-0-10-1	200.00	0.00	0.12	0.02	49.68	50.32	15.46	2.29
2-100-75-0-10-1	200.00	0.00	0.08	0.01	51.21	48.79	18.19	2.61
3-100-75-0-10-1	200.00	0.00	0.04	0.00	52.04	47.96	21.77	3.73
4-100-75-0-10-1	200.00	0.00	0.03	0.00	51.55	48.45	25.58	4.79
5-100-75-0-10-1	199.03	11.63	0.02	0.00	48.61	51.39	28.28	5.86
6-100-75-0-10-1	188.59	39.02	0.01	0.00	45.00	55.00	30.11	6.61
1-100-75-0-10-2	200.00	0.00	0.14	0.01	49.73	50.27	18.95	2.72
2-100-75-0-10-2	200.00	0.00	0.08	0.01	49.45	50.55	18.07	2.65
3-100-75-0-10-2	200.00	0.00	0.04	0.00	50.50	49.50	21.97	3.75
4-100-75-0-10-2	200.00	0.00	0.02	0.00	51.34	48.66	25.61	4.89
5-100-75-0-10-2	198.72	13.46	0.02	0.00	44.81	55.19	28.15	5.86
6-100-75-0-10-2	183.32	46.45	0.01	0.00	54.31	45.69	29.41	7.43
1-100-75-0-10-4	200.00	0.00	0.17	0.03	48.82	51.18	22.94	3.82
2-100-75-0-10-4	200.00	0.00	0.08	0.01	50.65	49.35	22.48	3.68
3-100-75-0-10-4	200.00	0.00	0.04	0.00	50.66	49.34	21.97	3.84
4-100-75-0-10-4	200.00	0.00	0.03	0.00	47.53	52.47	25.47	5.01
5-100-75-0-10-4	198.56	14.36	0.02	0.00	51.04	48.96	28.15	5.96
6-100-75-0-10-4	188.95	38.21	0.01	0.00	60.26	39.74	30.17	6.51
1-100-75-0-10-8	200.00	0.00	0.19	0.03	51.26	48.74	26.29	4.49
2-100-75-0-10-8	200.00	0.00	0.09	0.01	53.46	46.54	26.13	4.54
3-100-75-0-10-8	200.00	0.00	0.05	0.00	48.11	51.89	25.83	5.03
4-100-75-0-10-8	200.00	0.00	0.03	0.00	50.58	49.42	25.85	4.81
5-100-75-0-10-8	198.84	13.02	0.02	0.00	52.48	47.52	28.12	5.87
6-100-75-0-10-8	185.63	43.85	0.01	0.01	45.92	54.08	29.87	6.70
1-500-75-0-10-1	200.00	0.00	0.13	0.01	51.83	48.17	15.21	2.36
2-500-75-0-10-1	200.00	0.00	0.08	0.01	50.80	49.20	18.00	2.63
3-500-75-0-10-1	200.00	0.00	0.05	0.00	50.66	49.34	21.94	3.63
4-500-75-0-10-1	200.00	0.00	0.03	0.00	51.46	48.54	25.35	5.06
5-500-75-0-10-1	198.53	14.64	0.02	0.00	43.87	56.14	28.21	5.95
6-500-75-0-10-1	182.69	47.48	0.01	0.00	52.10	47.90	29.42	7.36
1-500-75-0-10-2	200.00	0.00	0.15	0.01	48.42	51.58	18.44	2.73
2-500-75-0-10-2	200.00	0.00	0.08	0.01	51.69	48.31	17.97	2.60
3-500-75-0-10-2	200.00	0.00	0.05	0.00	49.61	50.39	21.84	3.81
4-500-75-0-10-2	199.86	4.30	0.03	0.00	48.72	51.28	25.69	4.96
5-500-75-0-10-2	199.32	9.63	0.02	0.00	49.85	50.15	28.17	5.84
6-500-75-0-10-2	184.23	45.13	0.01	0.00	46.36	53.64	29.41	7.60
1-500-75-0-10-4	200.00	0.00	0.17	0.02	50.22	49.78	22.81	3.67
2-500-75-0-10-4	200.00	0.00	0.09	0.01	48.51	51.49	22.26	3.59
3-500-75-0-10-4	200.00	0.00	0.05	0.00	49.45	50.55	22.01	3.66
4-500-75-0-10-4	199.87	4.17	0.03	0.00	49.67	50.33	25.60	4.85
5-500-75-0-10-4	198.47	14.79	0.02	0.00	48.65	51.35	28.16	5.91
6-500-75-0-10-4	185.22	44.53	0.01	0.00	49.00	51.00	29.74	6.97

1-500-75-0-10-8	200.00	0.00	0.20	0.04	53.15	46.85	26.54	4.60
2-500-75-0-10-8	199.86	4.49	0.10	0.01	51.67	48.33	25.51	4.79
3-500-75-0-10-8	200.00	0.00	0.05	0.01	48.65	51.35	25.54	4.99
4-500-75-0-10-8	200.00	0.00	0.03	0.00	49.55	50.45	25.71	4.94
5-500-75-0-10-8	199.60	7.33	0.02	0.00	52.85	47.15	28.27	5.76
6-500-75-0-10-8	184.90	44.49	0.01	0.00	49.52	50.48	29.66	7.10
1-1000-75-0-10-1	200.00	0.00	0.14	0.01	50.48	49.52	14.74	2.38
2-1000-75-0-10-1	200.00	0.00	0.08	0.01	46.79	53.21	17.42	2.71
3-1000-75-0-10-1	200.00	0.00	0.05	0.00	50.90	49.10	21.39	3.76
4-1000-75-0-10-1	200.00	0.00	0.03	0.00	51.46	48.54	25.19	5.07
5-1000-75-0-10-1	198.71	13.70	0.02	0.00	49.22	50.78	28.32	5.87
6-1000-75-0-10-1	184.14	45.80	0.01	0.01	52.78	47.22	29.61	7.16
1-1000-75-0-10-2	200.00	0.00	0.16	0.02	49.46	50.54	17.84	2.81
2-1000-75-0-10-2	200.00	0.00	0.08	0.01	52.17	47.83	17.41	2.64
3-1000-75-0-10-2	200.00	0.00	0.05	0.00	50.55	49.45	21.44	3.88
4-1000-75-0-10-2	200.00	0.00	0.03	0.00	49.16	50.84	25.27	5.08
5-1000-75-0-10-2	198.61	13.90	0.02	0.00	50.55	49.45	27.84	6.10
6-1000-75-0-10-2	185.26	44.49	0.01	0.01	49.00	51.00	29.80	6.87
1-1000-75-0-10-4	200.00	0.00	0.18	0.03	50.94	49.06	22.34	3.80
2-1000-75-0-10-4	200.00	0.00	0.09	0.01	51.62	48.38	21.74	3.72
3-1000-75-0-10-4	200.00	0.00	0.05	0.02	46.91	53.09	21.45	3.72
4-1000-75-0-10-4	200.00	0.00	0.03	0.00	53.85	46.15	25.28	4.99
5-1000-75-0-10-4	198.44	14.88	0.02	0.00	48.00	52.00	28.01	5.87
6-1000-75-0-10-4	188.50	39.46	0.01	0.01	46.84	53.16	30.13	6.52
1-1000-75-0-10-8	199.89	3.61	0.19	0.02	54.03	45.97	25.63	4.79
2-1000-75-0-10-8	200.00	0.00	0.09	0.01	50.51	49.49	25.78	4.71
3-1000-75-0-10-8	200.00	0.00	0.05	0.01	49.20	50.80	25.59	5.10
4-1000-75-0-10-8	200.00	0.00	0.03	0.00	52.14	47.86	25.33	5.01
5-1000-75-0-10-8	197.80	17.93	0.02	0.00	50.59	49.41	28.24	5.78
6-1000-75-0-10-8	183.41	46.53	0.01	0.01	46.49	53.51	29.46	7.32
1-100-75-0-30-1	183.89	43.83	0.14	0.03	51.10	48.90	10.13	3.70
2-100-75-0-30-1	195.07	25.71	0.08	0.01	47.17	52.83	10.38	3.02
3-100-75-0-30-1	198.12	15.91	0.05	0.00	49.73	50.27	13.15	3.49
4-100-75-0-30-1	197.91	16.99	0.03	0.01	47.67	52.33	17.56	5.31
5-100-75-0-30-1	191.99	33.32	0.02	0.00	48.37	51.63	22.26	7.69
6-100-75-0-30-1	157.44	66.49	0.01	0.00	48.30	51.70	25.33	10.82
1-100-75-0-30-2	195.87	23.27	0.15	0.04	49.26	50.74	11.43	3.16
2-100-75-0-30-2	193.41	29.57	0.08	0.01	49.10	50.90	10.43	2.98
3-100-75-0-30-2	198.53	14.00	0.05	0.02	51.81	48.19	13.30	3.55
4-100-75-0-30-2	198.37	14.91	0.03	0.00	49.84	50.16	18.03	5.27
5-100-75-0-30-2	189.38	37.74	0.02	0.00	51.80	48.20	21.93	7.75
6-100-75-0-30-2	157.35	66.77	0.01	0.00	49.49	50.51	25.46	10.69
1-100-75-0-30-4	199.30	9.87	0.17	0.04	49.52	50.48	14.74	3.71
2-100-75-0-30-4	198.49	14.38	0.09	0.01	47.07	52.93	13.85	3.49
3-100-75-0-30-4	198.45	14.24	0.05	0.00	49.62	50.38	13.20	3.41
4-100-75-0-30-4	198.73	13.42	0.03	0.00	50.43	49.57	18.00	5.24
5-100-75-0-30-4	189.80	36.55	0.02	0.00	48.52	51.48	21.76	7.51
6-100-75-0-30-4	159.41	65.07	0.01	0.00	46.13	53.87	25.52	10.77
1-100-75-0-30-8	198.31	14.81	0.19	0.04	47.96	52.04	19.57	5.23
2-100-75-0-30-8	199.42	8.65	0.10	0.02	51.82	48.18	18.08	5.10
3-100-75-0-30-8	198.28	15.12	0.05	0.01	49.78	50.22	17.46	5.26

4-100-75-0-30-8	198.53	14.61	0.03	0.00	49.40	50.60	17.65	5.01
5-100-75-0-30-8	189.70	36.87	0.02	0.00	53.55	46.45	21.88	7.99
6-100-75-0-30-8	156.81	66.75	0.01	0.00	48.99	51.01	25.13	10.97
1-500-75-0-30-1	181.84	45.82	0.15	0.01	49.18	50.82	9.76	3.55
2-500-75-0-30-1	194.95	25.90	0.10	0.01	49.31	50.69	10.06	2.89
3-500-75-0-30-1	198.38	14.79	0.06	0.01	50.00	50.00	12.93	3.40
4-500-75-0-30-1	196.75	21.25	0.03	0.01	48.32	51.68	17.58	5.56
5-500-75-0-30-1	189.27	37.61	0.02	0.01	48.15	51.85	21.76	8.13
6-500-75-0-30-1	155.72	67.10	0.01	0.01	46.25	53.75	25.02	10.95
1-500-75-0-30-2	194.00	27.36	0.16	0.05	51.34	48.66	10.98	3.24
2-500-75-0-30-2	194.10	27.59	0.10	0.02	52.33	47.67	10.32	3.13
3-500-75-0-30-2	198.47	14.56	0.06	0.01	49.89	50.11	13.20	3.66
4-500-75-0-30-2	198.02	16.72	0.04	0.01	51.29	48.71	17.13	5.31
5-500-75-0-30-2	192.16	32.64	0.02	0.01	46.81	53.19	21.96	7.73
6-500-75-0-30-2	157.05	66.03	0.01	0.01	48.51	51.50	24.98	11.14
1-500-75-0-30-4	198.83	12.37	0.17	0.04	50.68	49.32	14.23	3.50
2-500-75-0-30-4	198.65	13.53	0.10	0.01	48.15	51.85	13.61	3.42
3-500-75-0-30-4	198.32	14.88	0.06	0.01	51.53	48.47	13.19	3.57
4-500-75-0-30-4	197.44	18.99	0.03	0.02	46.13	53.87	17.66	5.23
5-500-75-0-30-4	191.02	34.80	0.02	0.01	51.17	48.83	21.81	7.42
6-500-75-0-30-4	157.51	66.62	0.01	0.01	51.71	48.29	25.46	10.62
1-500-75-0-30-8	198.74	12.64	0.20	0.04	52.91	47.09	19.27	5.30
2-500-75-0-30-8	198.05	15.90	0.11	0.02	50.74	49.26	18.25	5.19
3-500-75-0-30-8	199.05	11.34	0.06	0.01	50.43	49.57	17.81	5.34
4-500-75-0-30-8	198.73	13.46	0.03	0.01	46.97	53.03	17.65	5.22
5-500-75-0-30-8	188.95	38.49	0.02	0.01	48.21	51.79	21.95	7.49
6-500-75-0-30-8	156.63	67.09	0.01	0.01	48.99	51.01	25.38	10.64
1-1000-75-0-30-1	187.73	34.58	0.15	0.02	52.10	47.90	8.87	3.47
2-1000-75-0-30-1	195.64	22.52	0.09	0.01	49.57	50.43	9.72	2.70
3-1000-75-0-30-1	198.67	13.39	0.06	0.01	50.43	49.57	12.74	3.43
4-1000-75-0-30-1	198.26	15.24	0.03	0.01	49.57	50.43	17.34	5.34
5-1000-75-0-30-1	189.26	37.91	0.02	0.01	48.90	51.10	21.46	7.77
6-1000-75-0-30-1	157.64	66.34	0.01	0.01	47.44	52.56	25.26	10.91
1-1000-75-0-30-2	195.81	20.83	0.15	0.01	48.41	51.59	10.22	3.20
2-1000-75-0-30-2	197.37	17.66	0.09	0.01	52.18	47.82	9.60	2.69
3-1000-75-0-30-2	198.83	11.93	0.06	0.01	48.28	51.72	12.35	3.42
4-1000-75-0-30-2	198.96	11.69	0.03	0.00	53.41	46.59	17.61	5.49
5-1000-75-0-30-2	190.83	34.94	0.02	0.01	49.33	50.67	22.05	7.72
6-1000-75-0-30-2	157.17	66.43	0.01	0.01	51.18	48.82	25.25	10.86
1-1000-75-0-30-4	198.42	12.82	0.17	0.02	49.95	50.05	13.36	3.40
2-1000-75-0-30-4	199.32	9.65	0.10	0.01	49.79	50.21	13.04	3.37
3-1000-75-0-30-4	198.87	11.95	0.06	0.01	50.59	49.41	12.58	3.54
4-1000-75-0-30-4	198.12	15.87	0.03	0.01	47.12	52.88	17.40	5.26
5-1000-75-0-30-4	192.16	32.71	0.02	0.01	49.34	50.66	21.83	7.71
6-1000-75-0-30-4	162.58	63.57	0.01	0.01	45.98	54.02	26.03	10.47
1-1000-75-0-30-8	199.20	9.14	0.19	0.04	50.37	49.63	18.24	5.15
2-1000-75-0-30-8	198.52	13.55	0.10	0.02	48.00	52.00	18.02	5.13
3-1000-75-0-30-8	199.54	7.38	0.06	0.01	48.85	51.15	17.68	5.25
4-1000-75-0-30-8	198.56	13.67	0.03	0.00	50.43	49.57	17.44	5.26
5-1000-75-0-30-8	188.94	38.22	0.02	0.01	49.61	50.39	21.67	7.68
6-1000-75-0-30-8	153.96	68.14	0.02	0.01	52.37	47.63	24.99	10.82

1-100-75-0-50-1	122.56	66.59	0.18	0.03	51.23	48.77	10.21	4.72
2-100-75-0-50-1	136.05	66.24	0.10	0.03	52.15	47.85	9.17	3.92
3-100-75-0-50-1	168.09	57.45	0.06	0.01	50.69	49.31	9.15	3.50
4-100-75-0-50-1	184.79	42.92	0.03	0.00	51.05	48.95	12.60	4.79
5-100-75-0-50-1	174.46	54.48	0.02	0.00	51.82	48.18	17.06	7.89
6-100-75-0-50-1	131.18	72.16	0.02	0.01	51.66	48.34	20.83	12.25
1-100-75-0-50-2	150.95	64.67	0.18	0.04	47.22	52.78	10.09	4.09
2-100-75-0-50-2	138.87	66.59	0.10	0.02	52.01	47.99	8.99	4.07
3-100-75-0-50-2	172.96	53.73	0.06	0.01	49.06	50.94	9.20	3.42
4-100-75-0-50-2	181.82	46.71	0.03	0.00	47.17	52.83	12.54	4.65
5-100-75-0-50-2	173.68	54.77	0.02	0.00	49.23	50.77	17.19	7.86
6-100-75-0-50-2	123.65	73.07	0.01	0.00	51.14	48.86	20.10	12.05
1-100-75-0-50-4	177.32	49.57	0.19	0.05	48.49	51.51	11.17	3.68
2-100-75-0-50-4	173.06	52.97	0.12	0.05	50.94	49.06	10.02	3.54
3-100-75-0-50-4	168.93	56.74	0.06	0.01	48.75	51.25	9.24	3.35
4-100-75-0-50-4	183.40	44.20	0.03	0.00	51.31	48.69	12.73	4.81
5-100-75-0-50-4	173.26	55.41	0.02	0.00	50.88	49.12	17.02	7.79
6-100-75-0-50-4	126.19	73.03	0.01	0.00	51.86	48.14	20.33	12.07
1-100-75-0-50-8	189.88	34.99	0.21	0.04	49.69	50.31	14.55	4.62
2-100-75-0-50-8	184.83	40.74	0.12	0.02	55.32	44.68	13.40	4.62
3-100-75-0-50-8	185.95	40.08	0.06	0.01	52.50	47.50	12.66	4.68
4-100-75-0-50-8	181.70	46.51	0.03	0.00	54.15	45.85	12.82	4.88
5-100-75-0-50-8	171.25	56.76	0.02	0.00	50.65	49.35	17.00	7.78
6-100-75-0-50-8	126.42	73.03	0.01	0.00	51.47	48.53	20.26	12.16
1-500-75-0-50-1	125.70	65.20	0.19	0.04	49.74	50.26	9.51	4.47
2-500-75-0-50-1	141.62	65.63	0.13	0.03	50.21	49.79	8.83	3.93
3-500-75-0-50-1	170.99	55.27	0.07	0.01	50.62	49.38	9.19	3.38
4-500-75-0-50-1	184.44	44.03	0.04	0.01	50.32	49.68	12.54	4.72
5-500-75-0-50-1	175.22	54.45	0.03	0.01	51.12	48.88	17.84	7.85
6-500-75-0-50-1	129.48	73.04	0.02	0.01	53.07	46.93	20.98	12.00
1-500-75-0-50-2	148.67	64.28	0.19	0.03	50.72	49.28	9.53	4.14
2-500-75-0-50-2	138.12	66.11	0.13	0.02	50.46	49.54	9.02	4.04
3-500-75-0-50-2	169.50	56.00	0.07	0.01	49.02	50.98	9.09	3.49
4-500-75-0-50-2	186.53	40.34	0.04	0.01	52.52	47.48	12.61	4.91
5-500-75-0-50-2	175.38	53.67	0.03	0.01	51.05	48.95	17.57	7.98
6-500-75-0-50-2	127.02	73.40	0.02	0.01	46.92	53.08	20.77	11.95
1-500-75-0-50-4	181.20	45.78	0.21	0.06	49.38	50.62	10.69	3.64
2-500-75-0-50-4	173.32	52.99	0.13	0.02	48.27	51.73	9.76	3.56
3-500-75-0-50-4	170.09	56.28	0.07	0.01	49.41	50.59	9.03	3.45
4-500-75-0-50-4	182.41	45.76	0.04	0.01	50.16	49.84	12.70	4.80
5-500-75-0-50-4	170.12	57.90	0.03	0.01	49.78	50.22	17.17	7.71
6-500-75-0-50-4	124.27	72.75	0.02	0.01	45.44	54.56	19.88	12.16
1-500-75-0-50-8	189.99	34.46	0.22	0.04	47.61	52.39	14.32	4.77
2-500-75-0-50-8	187.11	38.72	0.14	0.02	50.83	49.17	13.67	4.78
3-500-75-0-50-8	186.27	40.30	0.08	0.01	51.43	48.57	12.81	4.77
4-500-75-0-50-8	182.26	46.03	0.04	0.01	49.68	50.32	12.41	4.92
5-500-75-0-50-8	173.00	55.39	0.03	0.01	54.35	45.65	17.25	7.77
6-500-75-0-50-8	125.66	73.15	0.02	0.01	51.75	48.25	20.50	11.92
1-1000-75-0-50-1	140.05	58.54	0.17	0.02	49.95	50.05	8.50	4.30
2-1000-75-0-50-1	156.48	59.43	0.11	0.01	49.69	50.31	7.96	3.57
3-1000-75-0-50-1	176.49	49.58	0.07	0.01	50.21	49.79	8.93	3.37

4-1000-75-0-50-1	184.27	43.00	0.04	0.01	50.58	49.42	12.49	4.88
5-1000-75-0-50-1	173.85	54.70	0.03	0.01	48.07	51.93	17.27	7.90
6-1000-75-0-50-1	125.27	73.15	0.02	0.01	53.10	46.90	20.31	11.95
1-1000-75-0-50-2	160.15	54.32	0.17	0.03	51.94	48.06	8.48	3.86
2-1000-75-0-50-2	152.61	60.07	0.11	0.01	49.69	50.31	7.87	3.35
3-1000-75-0-50-2	176.82	49.93	0.07	0.01	50.74	49.26	8.92	3.46
4-1000-75-0-50-2	185.39	41.97	0.04	0.01	51.17	48.83	12.46	4.87
5-1000-75-0-50-2	177.88	51.22	0.03	0.01	48.02	51.98	17.33	7.81
6-1000-75-0-50-2	129.46	73.25	0.02	0.01	48.97	51.03	21.02	12.03
1-1000-75-0-50-4	182.14	42.07	0.18	0.03	48.18	51.82	9.81	3.65
2-1000-75-0-50-4	181.87	43.90	0.12	0.01	51.77	48.23	9.30	3.15
3-1000-75-0-50-4	176.46	50.37	0.07	0.01	48.59	51.41	8.89	3.33
4-1000-75-0-50-4	185.60	41.72	0.04	0.01	52.17	47.83	12.18	4.64
5-1000-75-0-50-4	177.66	51.70	0.03	0.01	49.67	50.33	17.32	7.77
6-1000-75-0-50-4	123.14	72.72	0.02	0.01	50.28	49.72	19.92	12.02
1-1000-75-0-50-8	190.59	32.01	0.20	0.04	47.68	52.32	13.33	4.92
2-1000-75-0-50-8	190.41	33.40	0.12	0.02	48.85	51.15	13.07	4.52
3-1000-75-0-50-8	187.65	38.09	0.07	0.01	50.42	49.58	12.26	4.61
4-1000-75-0-50-8	184.18	42.96	0.04	0.01	50.85	49.15	12.13	4.83
5-1000-75-0-50-8	175.49	53.72	0.03	0.01	51.32	48.68	17.30	7.86
6-1000-75-0-50-8	127.16	72.68	0.02	0.01	53.85	46.15	20.47	12.12
1-100-75-0-70-1	90.11	49.57	0.21	0.04	49.39	50.61	10.01	4.92
2-100-75-0-70-1	88.05	46.43	0.13	0.02	51.87	48.13	9.29	4.12
3-100-75-0-70-1	108.51	60.75	0.07	0.02	49.59	50.41	7.93	3.71
4-100-75-0-70-1	141.40	67.11	0.04	0.01	48.95	51.05	8.98	4.11
5-100-75-0-70-1	146.19	68.04	0.02	0.00	50.83	49.17	13.20	7.01
6-100-75-0-70-1	97.66	67.46	0.02	0.00	48.37	51.63	16.09	11.30
1-100-75-0-70-2	97.81	55.22	0.22	0.05	49.75	50.25	10.02	4.82
2-100-75-0-70-2	91.51	48.38	0.13	0.03	53.35	46.65	9.36	4.26
3-100-75-0-70-2	112.72	62.13	0.07	0.01	49.38	50.62	7.84	3.66
4-100-75-0-70-2	140.23	67.11	0.04	0.01	50.11	49.89	9.22	4.04
5-100-75-0-70-2	148.63	67.56	0.02	0.00	49.27	50.73	12.86	6.84
6-100-75-0-70-2	102.43	68.23	0.02	0.00	51.84	48.16	16.35	11.73
1-100-75-0-70-4	129.12	64.99	0.22	0.05	47.98	52.02	9.95	4.33
2-100-75-0-70-4	115.99	62.86	0.14	0.04	49.79	50.21	9.17	4.08
3-100-75-0-70-4	111.69	61.01	0.07	0.01	45.35	54.65	7.78	3.73
4-100-75-0-70-4	146.89	66.42	0.04	0.02	53.19	46.81	9.28	4.10
5-100-75-0-70-4	148.41	67.35	0.02	0.01	51.26	48.74	13.36	7.13
6-100-75-0-70-4	104.57	69.80	0.02	0.00	49.24	50.76	16.92	11.80
1-100-75-0-70-8	154.82	61.84	0.23	0.05	50.63	49.37	11.48	4.52
2-100-75-0-70-8	151.55	62.46	0.14	0.03	52.29	47.71	10.14	4.02
3-100-75-0-70-8	141.69	65.33	0.07	0.01	48.26	51.74	9.17	4.07
4-100-75-0-70-8	140.92	67.40	0.04	0.01	48.32	51.68	9.36	4.30
5-100-75-0-70-8	152.10	66.29	0.02	0.00	52.48	47.52	12.93	6.94
6-100-75-0-70-8	101.12	67.80	0.01	0.00	51.16	48.84	16.21	11.57
1-500-75-0-70-1	86.63	45.35	0.23	0.03	51.22	48.78	9.81	4.70
2-500-75-0-70-1	94.38	52.04	0.16	0.03	49.80	50.20	9.03	4.40
3-500-75-0-70-1	109.98	60.79	0.09	0.02	49.85	50.15	7.95	3.82
4-500-75-0-70-1	141.15	67.36	0.05	0.01	50.26	49.74	9.11	4.15
5-500-75-0-70-1	145.26	68.12	0.03	0.01	51.81	48.19	13.09	7.08
6-500-75-0-70-1	99.92	67.97	0.02	0.01	53.32	46.68	16.37	11.48

1-500-75-0-70-2	98.79	54.67	0.23	0.03	51.43	48.57	9.82	4.69
2-500-75-0-70-2	95.36	52.31	0.16	0.02	48.22	51.78	8.86	4.21
3-500-75-0-70-2	111.37	62.25	0.09	0.01	49.38	50.63	7.96	3.86
4-500-75-0-70-2	141.41	67.08	0.05	0.01	47.13	52.87	8.99	4.10
5-500-75-0-70-2	147.54	67.84	0.03	0.01	48.00	52.00	13.23	7.00
6-500-75-0-70-2	97.42	66.57	0.02	0.01	49.02	50.98	15.70	11.45
1-500-75-0-70-4	128.75	65.39	0.24	0.04	51.28	48.72	9.74	4.40
2-500-75-0-70-4	120.37	63.18	0.17	0.04	52.27	47.73	8.90	3.96
3-500-75-0-70-4	106.90	60.15	0.09	0.02	51.33	48.67	8.09	3.85
4-500-75-0-70-4	141.96	67.28	0.05	0.01	49.58	50.42	9.24	4.15
5-500-75-0-70-4	146.04	68.28	0.03	0.01	46.20	53.80	12.94	6.85
6-500-75-0-70-4	98.17	67.25	0.02	0.01	48.86	51.14	16.01	11.44
1-500-75-0-70-8	160.24	60.10	0.25	0.06	48.21	51.79	10.98	4.41
2-500-75-0-70-8	155.95	61.45	0.17	0.04	52.63	47.37	10.20	4.07
3-500-75-0-70-8	140.89	65.46	0.09	0.02	49.37	50.63	9.34	3.97
4-500-75-0-70-8	140.56	66.58	0.05	0.01	50.63	49.37	8.93	4.04
5-500-75-0-70-8	148.21	67.30	0.03	0.01	49.11	50.89	13.31	6.93
6-500-75-0-70-8	100.88	67.87	0.02	0.01	46.66	53.34	16.27	11.67
1-1000-75-0-70-1	106.55	49.98	0.20	0.02	50.62	49.38	8.49	4.65
2-1000-75-0-70-1	105.90	54.66	0.13	0.02	52.21	47.79	8.08	4.19
3-1000-75-0-70-1	121.02	62.91	0.08	0.01	52.74	47.26	7.74	3.69
4-1000-75-0-70-1	148.76	64.62	0.05	0.02	50.48	49.52	8.86	4.09
5-1000-75-0-70-1	150.62	66.87	0.03	0.01	53.01	46.99	13.22	6.71
6-1000-75-0-70-1	98.33	67.55	0.02	0.01	52.35	47.65	16.26	11.37
1-1000-75-0-70-2	115.94	55.47	0.20	0.03	49.64	50.37	8.56	4.68
2-1000-75-0-70-2	108.96	58.05	0.14	0.02	50.26	49.74	7.99	4.13
3-1000-75-0-70-2	122.62	64.15	0.09	0.01	48.53	51.47	7.66	3.89
4-1000-75-0-70-2	142.61	65.93	0.05	0.01	51.48	48.52	9.06	4.25
5-1000-75-0-70-2	148.57	67.12	0.03	0.01	49.16	50.84	13.23	7.05
6-1000-75-0-70-2	96.39	66.77	0.02	0.01	53.85	46.15	15.99	11.25
1-1000-75-0-70-4	134.70	58.62	0.21	0.04	48.81	51.19	8.60	4.08
2-1000-75-0-70-4	133.41	62.41	0.14	0.01	52.55	47.45	8.13	3.84
3-1000-75-0-70-4	122.23	62.42	0.08	0.01	49.74	50.26	7.74	3.71
4-1000-75-0-70-4	144.89	65.64	0.05	0.02	50.26	49.74	9.12	4.16
5-1000-75-0-70-4	150.45	66.54	0.03	0.01	50.94	49.06	13.05	6.87
6-1000-75-0-70-4	99.01	67.71	0.02	0.01	48.85	51.15	16.07	11.60
1-1000-75-0-70-8	159.69	56.78	0.22	0.04	50.94	49.06	10.27	4.31
2-1000-75-0-70-8	155.94	59.48	0.14	0.02	48.01	51.99	9.89	4.06
3-1000-75-0-70-8	151.23	62.23	0.09	0.01	49.58	50.42	9.08	3.93
4-1000-75-0-70-8	141.46	65.53	0.05	0.01	52.37	47.63	9.10	4.15
5-1000-75-0-70-8	149.90	66.99	0.03	0.01	51.32	48.68	13.25	7.00
6-1000-75-0-70-8	94.09	65.67	0.02	0.01	50.41	49.59	15.56	11.09
1-100-75-0-90-1	75.48	25.54	0.26	0.04	48.54	51.46	10.33	4.89
2-100-75-0-90-1	74.75	25.08	0.15	0.03	47.83	52.17	9.45	4.03
3-100-75-0-90-1	77.34	30.07	0.08	0.01	48.74	51.26	8.01	3.72
4-100-75-0-90-1	85.46	45.51	0.04	0.01	49.80	50.20	7.56	3.94
5-100-75-0-90-1	100.66	61.82	0.03	0.00	51.64	48.36	9.46	5.08
6-100-75-0-90-1	71.02	47.23	0.02	0.00	50.28	49.72	11.69	8.97
1-100-75-0-90-2	77.25	29.55	0.26	0.05	51.51	48.49	10.39	4.88
2-100-75-0-90-2	74.93	24.76	0.15	0.02	48.69	51.31	9.57	4.18
3-100-75-0-90-2	78.39	30.85	0.08	0.01	49.34	50.66	7.97	3.70

4-100-75-0-90-2	88.78	48.69	0.04	0.01	49.43	50.57	7.48	3.75
5-100-75-0-90-2	100.14	62.13	0.02	0.00	50.46	49.54	9.60	5.17
6-100-75-0-90-2	66.14	41.81	0.02	0.00	51.25	48.75	11.40	8.22
1-100-75-0-90-4	80.39	35.53	0.26	0.05	49.95	50.05	10.21	4.89
2-100-75-0-90-4	77.97	31.60	0.16	0.03	51.11	48.89	9.65	4.29
3-100-75-0-90-4	79.39	32.01	0.08	0.02	48.22	51.78	7.92	3.73
4-100-75-0-90-4	87.06	47.21	0.04	0.01	49.03	50.97	7.61	3.82
5-100-75-0-90-4	100.32	61.12	0.02	0.00	49.69	50.31	9.10	5.18
6-100-75-0-90-4	68.90	44.05	0.02	0.00	48.29	51.71	11.23	8.64
1-100-75-0-90-8	103.07	55.56	0.26	0.05	49.28	50.72	9.97	4.67
2-100-75-0-90-8	94.33	50.72	0.16	0.04	48.11	51.89	9.42	4.21
3-100-75-0-90-8	93.85	49.37	0.08	0.01	50.62	49.38	7.72	3.75
4-100-75-0-90-8	88.48	48.23	0.04	0.01	48.88	51.12	7.48	3.85
5-100-75-0-90-8	100.68	61.99	0.02	0.00	52.25	47.75	9.46	5.22
6-100-75-0-90-8	70.96	46.40	0.02	0.00	52.18	47.82	11.67	8.73
1-500-75-0-90-1	74.01	25.77	0.29	0.04	47.99	52.01	10.26	4.87
2-500-75-0-90-1	78.44	30.46	0.20	0.03	50.71	49.29	9.21	4.25
3-500-75-0-90-1	81.00	33.55	0.11	0.01	51.27	48.73	7.75	3.84
4-500-75-0-90-1	88.45	48.06	0.06	0.01	50.72	49.28	7.34	3.70
5-500-75-0-90-1	97.71	60.51	0.03	0.00	48.93	51.07	9.31	5.17
6-500-75-0-90-1	68.59	44.17	0.02	0.00	46.81	53.19	11.31	8.54
1-500-75-0-90-2	74.34	28.63	0.28	0.04	51.77	48.23	10.20	4.94
2-500-75-0-90-2	77.33	26.95	0.20	0.03	50.56	49.44	8.96	4.25
3-500-75-0-90-2	80.24	33.78	0.11	0.01	50.67	49.33	7.81	3.83
4-500-75-0-90-2	85.38	45.04	0.06	0.01	51.22	48.78	7.52	3.76
5-500-75-0-90-2	98.03	61.70	0.03	0.01	51.27	48.73	9.42	5.07
6-500-75-0-90-2	70.30	46.89	0.02	0.00	45.64	54.36	11.63	8.91
1-500-75-0-90-4	82.08	39.76	0.28	0.04	48.88	51.12	9.87	4.79
2-500-75-0-90-4	82.40	35.85	0.20	0.04	51.83	48.17	9.03	4.23
3-500-75-0-90-4	78.42	29.79	0.11	0.01	50.86	49.14	7.94	3.86
4-500-75-0-90-4	83.68	43.53	0.06	0.01	49.80	50.20	7.69	3.88
5-500-75-0-90-4	101.44	62.79	0.03	0.01	49.80	50.20	9.66	5.23
6-500-75-0-90-4	69.99	44.46	0.02	0.00	48.18	51.82	11.20	8.61
1-500-75-0-90-8	97.73	54.35	0.29	0.04	50.10	49.90	9.94	4.52
2-500-75-0-90-8	100.87	53.97	0.20	0.04	51.33	48.67	8.87	4.16
3-500-75-0-90-8	90.62	46.95	0.11	0.02	48.93	51.07	7.93	3.78
4-500-75-0-90-8	85.84	45.21	0.06	0.01	52.14	47.86	7.64	3.73
5-500-75-0-90-8	98.95	60.39	0.03	0.01	53.32	46.68	8.99	5.11
6-500-75-0-90-8	69.76	45.75	0.02	0.00	49.78	50.22	11.65	8.63
1-1000-75-0-90-1	85.97	34.80	0.23	0.02	49.80	50.20	9.15	4.87
2-1000-75-0-90-1	82.89	33.45	0.16	0.02	52.30	47.70	8.31	4.41
3-1000-75-0-90-1	83.14	36.06	0.10	0.02	54.00	46.00	7.60	3.82
4-1000-75-0-90-1	86.96	45.68	0.06	0.01	49.54	50.46	7.84	3.94
5-1000-75-0-90-1	100.91	61.60	0.04	0.01	50.61	49.39	9.63	5.06
6-1000-75-0-90-1	69.98	45.40	0.03	0.01	51.89	48.11	11.38	8.71
1-1000-75-0-90-2	87.45	36.12	0.23	0.03	49.29	50.71	9.31	4.86
2-1000-75-0-90-2	82.00	32.32	0.16	0.02	50.30	49.70	8.35	4.31
3-1000-75-0-90-2	81.72	34.01	0.10	0.01	51.87	48.13	7.75	3.90
4-1000-75-0-90-2	89.20	47.67	0.06	0.01	52.77	47.23	7.54	4.03
5-1000-75-0-90-2	103.23	62.44	0.04	0.01	48.93	51.07	9.40	4.97
6-1000-75-0-90-2	69.45	45.27	0.03	0.01	49.17	50.83	11.40	8.63

1-1000-75-0-90-4	91.51	40.29	0.23	0.03	49.85	50.15	9.03	4.78
2-1000-75-0-90-4	86.04	40.00	0.16	0.02	52.77	47.23	8.42	4.21
3-1000-75-0-90-4	80.66	33.33	0.10	0.01	49.08	50.92	7.83	3.82
4-1000-75-0-90-4	90.58	48.14	0.06	0.01	51.27	48.73	7.71	3.94
5-1000-75-0-90-4	104.07	62.74	0.04	0.01	50.15	49.85	9.63	5.20
6-1000-75-0-90-4	67.58	41.89	0.03	0.01	48.47	51.53	10.91	8.29
1-1000-75-0-90-8	107.54	52.21	0.23	0.04	51.13	48.87	9.00	4.56
2-1000-75-0-90-8	102.93	52.87	0.16	0.02	50.72	49.28	8.39	3.98
3-1000-75-0-90-8	93.60	48.86	0.11	0.02	51.49	48.51	8.06	3.82
4-1000-75-0-90-8	88.32	47.04	0.06	0.01	48.97	51.03	7.74	3.82
5-1000-75-0-90-8	98.11	60.70	0.04	0.01	51.53	48.47	9.62	5.11
6-1000-75-0-90-8	69.95	45.49	0.03	0.01	51.05	48.95	11.46	8.75

LITERATURVERZEICHNIS

- [Ancker 95] Ancker, C.J. Jr.: *A proposed Foundation for a Theory of Combat*. In „Warefare Modeling“, Military Operations Research Society, S. 165-198, Danvers MA, 1995.
- [AnwFE 222/100] Heeresamt: *Die Panzerkompanie - Anweisung für Führung und Einsatz 222/100 (zE)*. Köln, 1992.
- [Banks, Stytzs 2000] Banks, S.B., Stytz, M.R.: *Advancing the State of Human Behavior Representation for Modeling and Simulation: Technologies and Techniques*. In „Proceedings to the 9th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation“, 2000.
- [Bathe, Manwell 86] Bathe, M.R., Manwell, J.G.: *Modelling Combat as a Series of Minibattles*. School of Defense Management, Royal Military College of Science, Shrivenham, Swindon, England, 1986.
- [Bechmann 78] Bechmann, A.: *Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung*. Haupt Verlag, Bern Stuttgart, 1978.
- [Beckert 98] Beckert, U.: *Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur optimalen Feuerallokation sowie zur Bewertung von taktischen Optionen auf der Grundlage der multidimensionalen Nutzwertanalyse*. Diplomarbeit ID 04/98, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Dezember 1998.
- [BMVg 1999] Bundesministerium der Verteidigung: *Operative Leitlinie zum Einsatz der Streitkräfte (OpLESK)*. Bonn, August 1999.
- [BMVg 2002] Bundesministerium der Verteidigung: *Grundsätze für Modellbildung und Simulation in der Bundeswehr*. Berlin, März 2002.
- [Börger 85] Börger, E.: *Berechenbarkeit, Komplexität und Logik*. F. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1985.
- [Bonder 67] Bonder, S.: *The Lanchester Attrition-Rate Coefficient*. In „Operations Research 15“, Seite 221-232, 1967.
- [Bronstein et al. 95] Bronstein, I.N., Semendjajew K.A., Musiol, G. Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 2., überarbeitete Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1995.
- [Calude 88] Calude, C.; *Theories of Computational Complexity*. In “Annals of Discrete Mathematics No. 35”, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1988.
- [Clark 69] Clark, G. M.: *The Combat Analysis Model*. Ph.D. Thesis, Ohio State University, Columbus, Ohio, 1967.
- [Cobb et al. 93a] Cobb, L., Dockery, J.T., Woodcock A.E.R.: *Cellular Automata Models of Combat*. In Dockery, J.T. (Hrsg.), Woodcock, A.E.R. (Hrsg.): „The Military Landscape“. S.231-269. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 1993.

- [Codd 68] Codd, E.F.: *Cellular Automata*. Academic Press, Inc., New York und London, 1968.
- [Davis 95] Davis, P.K.: *Aggregation, Disaggregation, and the 3:1 Rule in Ground Combat*. RAND Report, 1995.
- [Davis et al. 2000] Davis, P.K., Bigelow, J.H., McEver, J.: *Informing and Calibrating a Multiresolution Exploratory Analysis Model with High Resolution Simulation: The Interdiction Problem as a Case Study*. In "Exploratory Analysis and a Case History of Multiresolution, Multiperspective Modeling", RAND, 2000.
- [Davis, Bigelow 98] Davis, P.K., Bigelow, J.H.: *Experiments in Multiresolution Modeling (MRM)*. RAND Report, 1998.
- [Davis, Hillestad 93] Davis, P.K., Hillestad, R.J.: *Families of models that cross levels of resolution: Issues for design, calibration and management*. In Proceedings zur Winter Simulation Conference, ACM, New York, 1993.
- [Davis, Huber 92] Davis, P.K., Huber, R.K.: *Variable-Resolution Combat Modeling: Motivations, Issues, and Principles*. RAND Note, Santa Monica, 1992.
- [Davis, Moeller 99] Davis, W.J., Moeller, G.L.: *The High Level Architecture: Is there a better Way?* In „Proceedings to the 1999 Winter Simulation Conference, 1999.
- [Davis, Zeigler 97] Davis, P.K., Zeigler, B.: *Multi-resolution Modeling and Integrated Families of Models*: In „Technology for the United States Navy and Marine Corps, 2000-2035: Becoming a 21st Century Force; Volume 9: Modeling and Simulation“, National Academy of Sciences, 1997.
- [Dynkin 61] Dynkin, E.B.: *Die Grundlage der Theorie der Markoffschen Prozesse*. In „Die Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften, Band 108“, Springer Verlage, Berlin, Göttingen und Heidelberg, 1961.
- [Franceschini et al. 2000] Franceschini, R.W., Mukherjee, A., Wu, A.S.: *Computational Strategies for Disaggregation*. In „Proceedings to the 9th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation“, 2000.
- [Gardener 70] Gardener, M.: *Mathematical Games*. In „Scientific American 223(4)“, S. 120-123, Oktober 1970.
- [Grundgesetz 95] Bundesrepublik Deutschland: *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland - Bereinigten Fassung, Stand 3. November 1995 (BGBl. I S. 1492)*. Berlin, November 1995.
- [HDv 100/100] Bundesministerium der Verteidigung – Führungsstab des Heeres III 3: *Truppenführung (TF) - HDV 100/100*. Bonn, Dezember 2000.
- [Hillestad et al. 95] Hillestad, R.J., Bennett, B.E., Moore, L. : *Modelling for Campaign Analysis : Lessons for the Next Generation of Models*. RAND Report, September 1995.

- [Hillier, Liebermann 88] Hillier, F.S., Liebermann, G.J.: *Operations Research – Einführung – 4. Auflage*. R. Oldenbourg Verlag, München und Wien, 1988.
- [Hofmann et al. 86] Hofmann, H.W., Litzbarksi, S., Rochel, T., Schaub, T.: *BASIS 2.0 – Ein Gefechtssimulationssystem auf Btl/Rgt-Ebene – Band 1: Beschreibung des Gefechtsmodells*. Institut für Angewandte Systemforschung und Operations Research, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, April 1986.
- [Hofmann et al. 2000] Hofmann, H.W., Hofmann, M., Pötzsch, V.: *Abschlussbericht zur Studie Führungsautomat Panzerzug*. IASFOR Bericht Nr. S-0007, Institut für Angewandte Systemforschung und Operations Research, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Oktober 2000.
- [Hofmann et al. 2001] Hofmann, H.W., Hofmann, M., Pötzsch, V.: *Zwischenbericht zur Studie Standardisierung der automatischen Führungssimulation Heer*. ITIS Bericht, Institut für Technik Intelligenter Systeme an der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Dezember 2001.
- [Hofmann M. 2000] Hofmann, M.: *Zur Abbildung von Führungsprozessen in hochauflösenden Gefechtssimulationssystemen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2000.
- [Hofmann M., Pötzsch 2001] Hofmann, M., Pötzsch, V.: *Validation: Possibilities and Limits in High Resolution Combat Simulation Systems*. In Proceedings zu SISO Workshop "European Simulation Interoperability Workshop 2001", Harrow, England, Juni 2001.
- [Huber et al. 2002] Huber, R.K., Hofmann, M., Niemeyer, K., Scheckeler, G.: *Abschlussbericht zur Studie Modellbildung und Simulation im erweiterten Aufgabenspektrum*. ITIS Bericht, Institut für Technik Intelligenter Systeme an der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, März 2002.
- [Hügler 2000] Hügler, H. (EADS Dornier): *Computer Generated Forces in IRIS*. In Proceedings zum Workshop "Führungsautomaten in Gefechtssimulationen des Heeres", IASFOR Bericht Nr. S-0006, Institut für Angewandte Systemforschung und Operations Research, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Dezember 2000.
- [Hügler 2001] Hügler, H. (EADS Dornier): *Standardisierung der Geländemodelle und – datenbanken*. In Proceedings zur CPM-Fachtagung "OR-Unterstützung Einsatz Heer", Koblenz, Juni 2001.
- [IABG 91] Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG) – Hauptabteilung Strategieanalysen: *PABST Präsentation*. In Vorträge zu ausgewählten Methoden der IABG, für BMVg Füh VI 1, Ottobrunn, Mai 1991.
- [Ilachinski 97] Ilachinski, A.: *Irreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat (ISSAC): An Artificial-Life Approach to Land Warfare (U)*. Center for Naval Analyses, Ford Avenue, Alexandria, Virginia, August 1997.

- [Jennings, Wooldrige 94] Jennings, R.N., Wooldridge, M.: *Intelligent Agents: Theory and Practice*. Queen Mary & Westfield College und Manchester Metropolitan University, Großbritannien, Oktober 1994.
- [Karr, Root 94] Karr, C.R., Root, E.: *Integrating Aggregate and vehicle Level Simulations*. In Proceedings zu Electronic Conference on Constructive Training Simulations, 1994.
- [Kappas 94] Kappas, M.: *Fernerkundung nah gebracht*. Dümmler Verlag, Bonn, 1994.
- [Knoll 91] Knoll, F.: *Gefecht verbundener Waffen Großverband (Modell HORUS) – Abschlußbericht*. Industrianlagen-Betriebsgesellschaft mbH, Ottobrunn, Dezember 1991.
- [Könke et al. 2000] Könke, D., Knoll, F., Kreitmair, T., Pfeiffer, E., Qian, J.: *Dokumentation Simulationsmodelle - Abschlußbericht*. Institut für Technik Intelligenter Systeme (ITIS), Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Mai, 2000.
- [Lanchester 14] Lanchester, F.W.: *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm – No. V., The Principle of Concentration*. In „Engineering 98“, S. 422-423, 1914.
- [Leffingwell 87] Leffingwell, J.W.R.: *The Laws of Combat? Lanchester Reexamined*. In „International Security 12(1)“, S. 89-134, 1987.
- [Lehmann et al. 2002] Lehmann, A., Berchtold, C., Brade, D., Hofmann, M., Köster, A., Krieger, T.: *Abschlussbericht zur Studie Verifizierung, Validierung und Akkreditierung von Modellen und Simulationen*. Institut für Technik Intelligenter Systeme (ITIS), Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Januar, 2002.
- [Markov 06] Markov, A.A.: *Die Erweiterung des Gesetzes großer Zahlen auf Größen, die voneinander abhängig sind*. In „Isw. Fis.-Matem. Obschtsch. Pri Kasansk. Uniw. (2) 15“, (russisch) S. 135-156, 1906.
- [Marks, Schlagowsky 96] Marks, R., Schlagowsky, R.: *Entwicklung und Implementierung eines Gefechtssimulationsmodells auf der Basis eines zellulären Automaten*. Diplomarbeit ID 04/96, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1996.
- [MSRR1] US Army Modeling & Simulation Resource Repository (MSRR): *Battle Management Language Level 1*. Online Dokumentation Stand Februar 2003, <http://www.msrr.army.mil/astars>.
- [NATO 95] NATO – RSG 18 Panel 7: *Stable Defence – Final Report; Technical Report AC/243 (Panel 7) TR/5*. Danish Defence Research Estab., Copenhagen, 1995.
- [NATO 99] NATO: *The Alliance's Strategic Concept*. NATO Press Release NAC-S(99)65, Washington D.C., April 1999.
- [NATO 2000] NATO: *STANAG ADatP-32, Edition 2.0. The Land Command and Control (C2) Information Exchange Data Model (LC2IEDM)*. Brüssel, März 2000.
- [Nilsson 82] Nilsson, N.J.: *Principles of Artificial Intelligence*. Springer, Berlin, 1982.

- [Peterson 67] Peterson, R.: *On the Logarithmic Law of Attrition and its Application to Tank Combat*. In „Operations Research 15“, Seite 557-558, 1967.
- [Pötzsch 97] Pötzsch, V.: *Entwicklung und Implementierung von Modulen für die Prozesse Bewegung, Abnutzung und Aufklärung und Entwurf eines Rahmens für Führungsmodule für das Gefechtssimulationsmodell COSIMAC*. Diplomarbeit ID 14/97, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, November 1997.
- [Reynolds et al. 97] Reynolds, P.F., Natrajan, A., Srinivasan, S.: *Consistency Maintenance in Multiresolution Simulations*. In ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, Vol. 7, No. 3, Seite 368-392, Juli 1997.
- [Rinne 95] Rinne, H.: *Taschenbuch der Statistik. 2.*, überarbeitete Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1995.
- [Rowland 82] Rowland, D.: *The Place for Tactically Interactive Field Trials in Data Collection*. In Huber, R.K. (Hrsg.): „Systems Analysis and Modeling in Defense.“, Seite 447-477, Plenum Press, New York, 1984.
- [Schaub 91a] Schaub, T.: *Zur Aggregation heterogener Abnutzungsprozesse in Gefechtssimulationsmodellen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Oktober 1991.
- [Schaub 91b] Schaub, T.: *BASIS 2.0 – Ein Gefechtssimulationssystem auf Btl / Rgt-Ebene – Band 2: Programmbeschreibung, Datenorganisation und Programmimplementierung*. Institut für Angewandte Systemforschung und Operations Research, Universität der Bundeswehr München, Neubiber, August 1991.
- [Schricker et al. 99] Schricker, S.A., Barbosa, E.J., Smith, R.G.: *Enhancing the Realism of Pseudo-Disaggregated Entities*. In „Proceedings to the 8th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation“, 1999.
- [Sisti, Farr 98] Sisti, A.F., Farr, S.D.: *Model Abstraction Techniques: An Intuitive Overview*. Air Force Research Laboratory/IFSB, Rome NY, 1998.
- [Taylor 83a] Taylor, J.G.: *Lanchester Models of Warfare – Volume I*. Operations Research Society of America, Arlington, Virginia, März 1983.
- [Taylor 83b] Taylor, J.G.: *Lanchester Models of Warfare – Volume II*. Operations Research Society of America, Arlington, Virginia, März 1983.
- [Tschujew 72] Tschujew, J.W.: *Operationsforschung im Militärwesen*. Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1972.
- [USDOD 95] United States of America, Under Secretary of Defence for Aquisition and Technology: *Modeling and Simulation (M&S) Master Plan*. Washington D.C., Oktober 1995.
- [USDOD 98] United States of America, Departement of Defence: *High-Level Architecture (HLA) Rules Version 1.3*. Washington D.C., Februar, 1998.

- [von Kirchbach 2000] von Kirchbach, H.-P.: *Eckwerte für die konzeptionelle und planerische Weiterentwicklung der Streitkräfte*. Bundesministerium der Verteidigung, Bonn, Mai 2000.
- [von Neumann, Burks 66] von Neumann, J., Burks, A.W.: *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana IL, 1966.
- [Weiss 59] Weiss, H.K.: *Some Differential Games of Tactical Interest and the Value of a Supporting Weapon System*. Operations Research 7, Seite 180-196, 1959.
- [Wollschläger 93] Wollschläger, H.: *Abschlussbericht zur Studie – Abbildung Infanterie in PABST*. IABG, Abt. ORH, Ottobrunn, Dezember 1993.
- [Zangenmeister 76] Zangenmeister, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. 4. Auflage, Wittemann-Verlag, München 1976.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	AGSHP ATCCIS	<u>A</u> usbildung <u>s</u> simulator für <u>H</u> and- und <u>P</u> anzerabwehrwaffen Army Tactical Command and Control Information System
B	BASIS BML BMVg Btl	GSS: <u>B</u> ataillons-Gefecht <u>s</u> simulation <u>s</u> system Battle Management Language Bundesminister der Verteidigung Bataillon
C	CGF C ⁴ I CORBA COSIMAC-WS-S COTS CRM CSIM	Computer Generated Forces Command, Communications, Control and Intelligence Common Object Request Broker Architecture GSS: <u>C</u> ombat <u>S</u> imulation System with <u>A</u> utomated <u>C</u> ontrol - Resolution down to the <u>W</u> eapon <u>s</u> ystem Level - implemented in <u>S</u> malltalk / Visual Works Comercial of the shelf Cross Resolution Modeling Constructive Simulation
D	DST	Decision Support Tools
E	EINSTein	GSS: <u>E</u> nhanced <u>I</u> SAAC <u>N</u> eural <u>S</u> imulation <u>T</u> ool
G	GSS	Gefechtssimulationssystem
H	HLA HORUS HRCSS HRS	High Level Architecture GSS: <u>H</u> eer <u>e</u> smodell für <u>O</u> perations <u>R</u> esearch <u>u</u> nd zur Ausbildung von <u>S</u> täben <u>H</u> igh- <u>R</u> esolution- <u>C</u> ombat- <u>S</u> imulation- <u>S</u> ystems High Resolution Entity
I	IABG IASFOR IRIS ISAAC ISAACA	Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH <u>I</u> nstitut für <u>A</u> ngewandte <u>S</u> ystem <u>f</u> orschung und <u>O</u> perations <u>R</u> esearch der Fakultät für Informatik an der Universität der Bundeswehr in München GSS: <u>I</u> nter <u>a</u> ktive <u>I</u> nfanterie <u>S</u> imulation GSS: <u>I</u> rreducible <u>S</u> emi- <u>A</u> utonomous <u>A</u> daptive <u>C</u> ombat <u>I</u> rreducible <u>S</u> emi- <u>A</u> utonomous <u>A</u> daptive <u>C</u> ombat <u>A</u> gent
K	Kp KPz	Kompanie Kampfpanzer
L	LC2IEDM LOS LRCSS LRS LSIM	Land Command and Control Information Exchange Data Model Line of Sight = Sichtlinie <u>L</u> ow- <u>R</u> esolution- <u>C</u> ombat- <u>S</u> imulation- <u>S</u> ystems Low Resolution Entity Live Simulation

M	M&S MRE MRM MTge	Modellbildung und Simulation Multiple Resolution Entity Multi Resolution Modeling Manntage (Maß der Arbeitsdauer)
O	OOP OOTW	Objektorientierte Programmierung Operations other than War
P	PABST	GSS: <u>P</u> anzer <u>A</u> bwehr <u>B</u> ewertungs <u>I</u> nstrument
S	SAMBA SPz	GSS: <u>S</u> imple <u>A</u> ttition <u>M</u> odel for variab <u>l</u> y <u>A</u> ggregated Forces Schützenpanzer
V	VRM VSIM	Variable Resolution Modeling Virtual Simulation
Z	ZEGA ZELGAT	GSS: <u>Z</u> ellulärer <u>G</u> efechts <u>a</u> utomat GSS: <u>Z</u> ellulärer <u>G</u> efechts <u>a</u> tom <u>a</u> t

INDEX

A

A*-Algorithmus147, 148
 Abbruchstärke154
 Abbruchzeit154
 Abnutzung38, 44, 79, 83, 86, 101, 102,
 107, 111, 116, 123, 127, 152, 176, 215,
 220, 221, 235, 236, 239, 243, 249, 285
 Agent90, 91, 92, 93, 287
 Aggregation.... I, 10, 15, 19, 20, 25, 28, 29,
 31, 32, 34, 43, 44, 46, 47, 79, 101, 102,
 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123,
 124, 125, 127, 159, 160, 161, 163, 167,
 170, 172, 177, 182, 197, 205, 206, 210,
 212, 213, 217, 218, 220, 228, 235, 238,
 242, 243, 244, 245, 249, 282, 285
 Aggregationsansatz .. I, 101, 116, 120, 124,
 206, 245, 246
 Aggregationsstufe.163, 166, 167, 169, 170,
 172, 173, 175, 177, 178, 181, 182, 183,
 186, 188, 189, 193, 200, 206, 207, 208,
 209, 210, 211, 212, 213, 215, 218, 220,
 223, 228, 230, 232, 233, 235, 236, 237,
 238, 239, 246
 Aggregierte Abbildung.....2, 64, 65, 93, 94,
 95, 159, 161, 163, 182, 187, 212, 217,
 223, 238, 243, 244, 245, 246
 Aggregierte Modellparameter ... I, 246, 247
 Aggregiertes Gefechtselement . I, 101, 102,
 107, 108, 111, 115, 117, 118, 122, 124,
 125, 127, 144, 155, 159, 162, 166, 169,
 178, 181, 189, 197, 212, 213, 215, 216,
 225, 227, 228, 235, 237, 238, 240, 242,
 243, 245, 246, 247, 249, 250, 251
 Aggregiertes Modell.19, 20, 21, 22, 23, 26,
 37, 39
 AGSHP.....9, 287
 Aktive Abnutzung1, 111, 245
 Alternative Submodelle.....38
 Analyse...3, 7, 9, 11, 20, 22, 23, 26, 37, 38,
 41, 43, 44, 46, 49, 63, 73, 78, 161, 169,
 173, 175, 181, 183, 186, 188, 193, 197,
 200, 212, 213, 221, 233
 Analysezwecke19, 161
 Angst *siehe auch human Factors*49, 55
 Asymmetrische Mächtigkeiten.....211, 243
 Aufklärung *siehe auch Zielaufklärung*...38,
 39, 75, 93, 101, 102, 107, 127, 131, 285

Auflösung 2, 10, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 24,
 26, 28, 29, 31, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41,
 43, 45, 46, 47, 95, 129, 238, 242
 Auflösungsoszillation 31, 34, 35, 47
 Auflösungsstufe . 28, 29, 31, 32, 35, 36, 37,
 43, 46, 47
 Auflösungsstufen 19, 24, 36, 39, 46, 47, 48,
 51
 Ausbildung. 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 22, 34,
 49, 73, 109, 287
 Ausgangsverteilung 69, 71, 72

B

BASIS ... 22, 65, 83, 86, 144, 283, 285, 287
 Bataillon *siehe auch Militärische*
Hierarchieebenen 51, 76, 287
 BML..... 12, 287
 BMVg 4, 73, 281, 283, 287
 Branch-and-Bound-Algorithmus 147
 Bündnisverteidigung..... 3, 4

C

CEP *siehe auch Circular Error Probable*
 41, 46
 CGF *siehe auch Computer Generated*
Forces 10, 287
 Chain Deaggregation *siehe auch*
Kettendeaggregation..... 29
 Circular Error Probable..... 41
 Comercial of the shelf..... 13, 287
 Computer Generated Forces .. 10, 281, 282,
 283, 285, 287
 CORBA..... 12, 287
 COTS *siehe auch Comercial of the shelf*
 13, 287
 CRM *siehe auch Cross Resolution*
Modeling..... 28, 35, 47, 287
 Cross Resolution Modeling . 24, 28, 34, 35,
 36, 47, 287

D

Deaggregationsbereich 34
 Deaggregationsmechanismus 25, 28, 39, 48
 Deaggregationsproblematik 15, 19
 Decision Support Tool *siehe auch*
Einsatzunterstützungssystem..... 14, 287
 Deckungsgrad 101, 104, 111, 131, 144, 145

Detaillierungsgrad 15, 17
 Detailprotokoll 157, 213, 253
 Disaggregation *siehe auch Deaggregation*
 15, 29, 32, 33, 35, 282
 Dislozierungsschablone. 102, 108, 118, 251
 DST *siehe auch Decision Support Tool* .14,
 287

E

Einsatzformen..... 4, 5
 Einsatzszenar 1, 6, 7, 11, 245
 Einsatzunterstützung ... 7, 11, 14, 20, 21, 73
 Einsatzunterstützungssystem.. 7, 11, 16, 20,
 31, 48
 EINSTein..... 93, 287
 Einzelschusssimulation .. 15, 38, 39, 73, 83,
 97, 99
 Einzelsystem..... I, 75, 101, 102, 103, 104,
 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113,
 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 122,
 123, 124, 125, 127, 131, 132, 137, 138,
 139, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147,
 150, 151, 152, 154, 155, 160, 162, 163,
 166, 169, 176, 177, 178, 181, 189, 193,
 197, 206, 207, 212, 215, 225, 226, 227,
 230, 235, 236, 238, 240, 242, 243, 244,
 245, 249, 250, 251, 254, 255
 Elementarer Gefechtsprozess 19, 49, 51,
 55, 64, 65, 78, 79, 86, 89, 93, 94, 95, 96,
 98, 99, 101, 105, 107, 114, 116, 119,
 127, 129, 159
 Empirischer Test 17
 Endstärke 86, 155
 Endzeit *siehe auch Abbruchzeit* ... 154, 229,
 231, 232, 233, 239
 Entdeckungswahrscheinlichkeit 93, 136,
 137, 163, 169, 175, 177, 178, 189, 212,
 251
 Erleideraktivität.... 101, 102, 104, 105, 111,
 112, 113, 114, 132, 137, 142, 143, 144,
 146, 152, 176, 197, 215
 Experimentalsystem I, 127, 246

F

Feuerallokation *siehe auch*
Feuerkoordination..... 58, 113, 116, 119,
 129, 133, 142, 143, 144, 281
 Feuerkoordination 75, 122, 163
 Fire Power Score 20
 Flachfeuergefecht I, 246

Fragestellung 8, 14, 20, 21, 22, 38, 41, 116,
 245
 Führungsmittel 6
Führungsprozess..... 7, 16, 89, 129, 283
 Full Deaggregation *siehe auch*
Vollständige Deaggregation..... 32

G

Game of Life..... 81, 82
 Gefecht der verbundenen Waffen 7, 16, 22,
 51, 55, 57, 61, 62, 78, 86, 245, 249
 Gefechtsdauer 156, 157, 169, 173, 175,
 176, 177, 178, 181, 182, 188, 218, 223,
 231, 232
 Gefechtsentfernung..... 166, 209, 230
 Gefechtsfeld. 16, 22, 34, 83, 89, 90, 93, 94,
 95, 96, 117, 129, 162
 Gefechtsgeschehen 9, 15, 17, 22, 24, 37,
 38, 39, 44, 49, 50, 78, 120, 157, 205,
 215, 217
 Gefechtssimulationsmodell.... 7, 15, 16, 17,
 19, 20, 22, 37, 73, 285
 Gefechtssimulationssystem. I, 2, 10, 14, 15,
 16, 17, 19, 22, 23, 26, 32, 41, 49, 50, 51,
 55, 65, 66, 67, 70, 73, 78, 79, 80, 83, 86,
 87, 89, 90, 93, 94, 95, 116, 127, 129,
 146, 163, 206, 238, 243, 245, 246, 249,
 283, 285, 287
 Geländeabbildung 87, 102, 129, 242
 Geländeschnitt 102, 107, 109, 116, 118,
 124, 133, 210, 225, 231, 243, 246
 Geländezelle .. 16, 129, 130, 134, 135, 147,
 148, 149, 150, 259, 260, 261
 Genauigkeit..... 2, 15, 16, 17, 20, 130, 132,
 252, 261
 Gesamtstärke 154, 156, 157, 160, 188, 205,
 206, 220, 229, 236, 239, 253
 Geschwindigkeitsklasse 150, 151, 152, 153,
 256
 Gewinnhäufigkeit 120, 159, 172, 188, 197,
 206, 211, 212, 213, 216, 218, 220, 221,
 223, 232
 Gewinnhäufigkeiten..... 96, 156, 157, 172,
 211, 216, 218, 220, 223, 232, 242, 243
 Grundszenar 159, 176, 206, 225
 Grundszenarvariante.... 166, 167, 172, 209,
 210, 213, 215, 216, 220, 221, 223, 228,
 230, 237, 239
 Gruppe *siehe auch Militärische*
Hierarchieebenen .. 9, 10, 14, 22, 38, 41,
 51, 101, 109, 114, 115, 125, 238, 246

Güte der Abbildung.....120, 163

H

Heterogenität49, 66, 245
 High Level Architecture.....12, 282, 287
 High Resolution Entity.....28, 287
 Hilfeleistung in Katastrophenfällen4
 HLA *siehe auch High Level Architecture*
12, 285, 287
 Hochauflösende Abbildung.....22
 Hochauflösendes
 Gefechtssimulationssystem ..1, 2, 20, 95,
 114, 245, 246, 247
 Höchstgeschwindigkeit22, 148
 Homogenität55, 57, 75, 78, 80, 91, 94
 HORUS50, 73, 74, 75, 76, 78, 284, 287
 HRCSS19, 287
 HRE *siehe auch High Resolution Entity* 28,
 29, 31, 32, 33, 34, 35, 47
 Human Factors ...49, 55, 66, 78, 86, 93, 95,
 99, 113
 Hunger *siehe auch human Factors*....17, 49

I

IASFOR.....86, 87, 283, 287
 IHVR *siehe auch Integrierte
 Prozesshierarchien variabler Auflösung*
41
 Infanterie I, 51, 87, 114, 125, 129, 130,
 140, 144, 145, 146, 154, 242, 244, 246,
 286, 287
 Informationsverlust124, 126, 225, 226,
 238, 240, 242, 243, 259
 Inkonsistenz.....28, 29, 30, 43
 Inkonsistenz in der Abbildung29, 30
 Integrierte Prozesshierarchien variabler
 Auflösung41
 Interoperabilität5, 6, 14
 IRIS21, 22, 283, 287
 ISAACA *siehe auch ISAAC* 90, 91, 92, 287
 ISSAC.....283

K

Kalter Krieg.....1, 3
 Kampfkraft20
 Kampfpanzer28, 29, 32, 33, 70, 74, 109,
 123, 287
 Kernprozess.....16, 17
 Kettendeaggregation.....29, 32, 33, 35, 47

Kompanie *siehe auch Militärische
 Hierarchieebenen* 16, 22, 51, 76, 287
 Komplexität 2, 5, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 38,
 49, 66, 99, 281
 Komplexitätstheorie..... 17
 Komplexitätszuwachs 17
 Konsistenz...I, 2, 19, 24, 25, 26, 35, 37, 39,
 41, 47, 48, 120, 159, 163, 173, 178, 181,
 209, 217, 218, 240, 243, 246
 Konsistenzbewertung... 161, 173, 183, 186,
 188, 211, 218, 220, 221, 232, 233, 238,
 239, 240
 Konstruktive Simulationen 9, 15
 Koordinatenposition 19, 29, 102, 107, 108,
 111, 124, 249, 250, 251
 KopplungI, 2, 11, 15, 19, 24, 28, 34, 35,
 36, 46, 245, 247
 Krisenbewältigung..... 4, 14
 Krisenreaktion..... 4
 Krisenszenar *siehe auch Einsatzszenar* 1
 Krisenverhinderung 5, 14

L

Lanchester...I, 2, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
 65, 66, 67, 68, 73, 83, 90, 246, 281, 284,
 285
 Lanchesterkoeffizient 22, 23, 52, 53, 55,
 60, 61, 63, 64, 65, 76, 78, 83
 Landes- und Bündnisverteidigung3, 4, 5, 6,
 14
 LC2IEDM 12, 284, 287
 Leitschütze 105
 Leitschützenprinzip.....I, 2, 101, 102, 103,
 104, 105, 107, 111, 112, 114, 115, 116,
 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124,
 125, 127, 129, 131, 132, 142, 144, 146,
 159, 160, 161, 162, 167, 182, 187, 197,
 205, 206, 207, 210, 211, 213, 217, 218,
 223, 225, 231, 238, 242, 243, 244, 245,
 246, 247, 249
 Lineares Gesetz von Lanchester 52, 53
 Live Simulationen..... 9, 10, 15
 Lokalität..... 80, 91, 94
 LOS *siehe auch Line Of Sight* 287
 Low Resolution Entity 28, 287
 LRCSS 19, 287
 LRE *siehe auch Low Resolution Entity* . 28,
 29, 31, 32, 33, 34, 35, 47

- M**
- M&S *siehe auch Modellbildung und Simulation*.....1, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 245, 285, 288
- Mächtigkeit...101, 103, 104, 107, 108, 111, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 122, 123, 125, 127, 129, 137, 144, 160, 162, 163, 166, 178, 189, 213, 215, 238, 249
- Mapping Inconsistency *siehe auch Inkonsistenz in der Abbildung*29
- Markov-Kette 67, 68, 69, 70, 71, 73, 75, 78
- Markov-Prozess..... I, 2, 50, 63, 67, 68, 78
- Messgröße120, 121, 127, 155, 160, 161, 172, 175, 178, 182, 183, 187, 188, 197, 206, 217, 218, 223, 232, 233, 237, 239, 242, 243, 259
- Modell I, 2, 3, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 57, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 68, 73, 76, 79, 83, 86, 87, 88, 89, 90, 93, 94, 99, 104, 109, 111, 112, 114, 116, 120, 127, 129, 130, 131, 150, 154, 155, 159, 178, 212, 226, 235, 238, 242, 243, 245, 246, 247, 249, 251, 253, 259, 284
- Modellbildung und Simulation.1, 2, 3, 6, 7, 14, 283, 288
- Modellentwickler36, 46, 127
- Modellentwicklers42
- Modellentwicklung.....21, 39, 43
- Modellfamilie36, 37, 38, 39, 40
- Modellparameter1, 245
- MRE *siehe auch Multiple Resolution Entity*47, 288
- MRM *siehe auch Multiple Resolution Modeling*47, 282, 288
- Müdigkeit *siehe auch human Factors*17
- Multiple Resolution Entity47, 288
- Multiple Resolution Modeling47
- N**
- Nachbarschaftsbeziehung 79, 80, 89, 91, 94
- Netzwerk stochastischer Kleingefechte ... I, 50, 96, 98
- Neukalibrierung.....1, 245
- Nicht aggregiertes Modell2, 245
- Niederhaltung. 85, 101, 105, 114, 115, 119, 132, 142, 146, 150, 152, 249, 251, 254, 255
- O**
- OOP 42, 288
- OOTW *siehe auch Operations other than War* 3, 5, 7, 288
- Operations other than War..... 3, 288
- P**
- Panzertruppe 22
- Parallelität 80, 91, 94
- Partial Deaggregation *siehe auch Partielle Deaggregation* 33
- Partielle Deaggregation 33
- Passive Abnutzung..... I, 49, 246
- Physikalischer Prozess..... 22
- Playbox *siehe auch Deaggregationsbereich*..... 34
- Prozess I, 10, 11, 15, 16, 17, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 46, 49, 63, 65, 66, 67, 70, 71, 78, 86, 93, 95, 99, 102, 105, 107, 109, 282, 285
- Prozesshierarchie 37, 41, 42, 43, 45, 46
- Pseudo-Deaggregation..... 35
- Q**
- Quadratisches Gesetz von Lanchester ... 50, 51, 52
- R**
- Rasterzelle..... 77
- Rechenzeit..... 20, 107, 117, 118, 155, 156, 157, 167, 169, 170, 210, 231
- Rechenzeitverhalten.. I, 159, 170, 210, 231, 244, 245, 246, 247
- Rettungs- und Evakuierungseinsätze im Ausland..... 4
- S**
- SAMBA I, 2, 101, 107, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 136, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 150, 151, 152, 154, 155, 157, 159, 163, 165, 169, 175, 176, 178, 189, 212, 213, 225, 235, 238, 246, 249, 253, 259, 288
- Schießaktivität 102, 105, 111, 112, 113, 114, 127, 131, 132, 142, 143, 144, 145, 197, 254, 255
- Schützenpanzer 55, 83, 288
- Schützentrupp 123
- Schwache Konsistenz 25, 26
- Schwerpunkt 19, 115

Schwerpunktbildung.....29, 102
 Seiteneffekte.....42, 43, 45
 Selbstorganisierendes Verhalten90, 95
 Selektive Betrachtung37
 Sensitivitätsbereich.....73
 Sicherheitsinteressen4
 Sicherheitspolitische Lage.....1, 3
 Sichtbereichsgruppengröße ..225, 226, 227,
 228, 230, 231, 232, 233, 235, 238, 239,
 242
 Sichtkontaktwahrscheinlichkeit ...225, 226,
 227, 228, 230, 231, 232, 233, 235, 236,
 237, 238, 239, 242, 259, 260, 261
 Sichtlinienbestimmung.118, 124, 126, 159,
 210, 225, 238, 240, 243
 Sichtverbindung77, 109, 124, 130, 133,
 134, 137, 162, 176, 225, 226, 228
 Sichtverbindungsmatrix227
 Siegwahrscheinlichkeiten.....71
 Simulationsergebnis .17, 20, 23, 26, 37, 48,
 64, 96, 129, 144, 159, 160, 161, 165,
 169, 206, 245
 Simulationslauf.....7, 18, 20, 36, 41, 64, 86,
 102, 108, 112, 119, 127, 147, 154, 155,
 157, 162, 165, 167, 169, 170, 172, 175,
 177, 181, 187, 208, 210, 217, 225, 226,
 227, 229, 231, 232, 253
 Simulationssystem I, 9, 12, 34, 47, 86, 101,
 102, 127, 150
 Simulationszeit16, 120, 138, 145, 153,
 154, 155, 156, 160, 188, 193, 197, 205,
 206, 220, 223, 239, 253
 Standardisierung.....12, 13, 283
 Starke Konsistenz.....25, 26, 160, 161, 178,
 182, 187, 193, 200, 205, 206, 221, 223,
 240, 242, 244
 Steilfeuer132, 152, 249, 250, 251
 Steilfeuerwaffensystem249
 Stochastischer Prozess.....67, 68
 Streitkräfte.. I, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 14, 51,
 66, 245, 281, 286
 Stress *siehe auch human Factors* 17, 49, 55
 Synergieeffekte.....49, 57, 66, 245
 Szenar I, 3, 5, 11, 14, 65, 84, 86, 97, 99,
 107, 120, 124, 129, 155, 157, 159, 161,
 162, 163, 197, 245, 247
 Szenarabhängigkeit I, 97, 99, 101, 116,
 245, 247
 Szenarbeschreibung.....1, 3, 13, 14, 98, 140

T

Taktung..... 94, 105
 Taxonomie 9, 10
 Temporal Inconsistency *siehe auch*
Zeitliche Inkonsistenz..... 28
 Trashing *siehe auch Auflösungsoszillation*
 31
 Trefferermittlung 92, 133, 144, 146
 Trupp *siehe auch Militärische*
Hierarchieebenen 51, 101, 125, 238,
 244, 246

Ü

Übergangsmatrix..... 68, 70, 71
 Übergangswahrscheinlichkeit..... 68, 70

U

UTM-Koordinate 130, 147, 253

V

Validierung..... 11, 14, 17, 284
 Variable Resolution Modeling... 24, 36, 46,
 47, 288
 Variantengruppe .. 167, 173, 175, 177, 200,
 216
 Verifikation..... 11
 Verifizierung..... 11, 14, 284
 Verlustbewertung..... 249, 251
 Verteilte Prozesse 42, 44
 Virtualisierung 10
 Virtualisierungsgrad 10
 Virtuelle Simulationen..... 9, 10, 15
 Vollständige Deaggregation 32
 VRM *siehe auch Variable Resolution*
Modeling.. 36, 37, 38, 39, 40, 41, 46, 47,
 288
 VRM-Fähigkeit..... 36, 37, 39, 40, 41, 46

W

Waffensystem .. 7, 9, 10, 14, 19, 20, 22, 28,
 34, 38, 39, 41, 44, 49, 51, 52, 53, 54, 55,
 57, 60, 62, 63, 65, 70, 73, 75, 76, 77, 78,
 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94,
 97, 101, 105, 113, 132, 136, 139, 144,
 145, 163
 Waffentrupp..... 242
 Weiche Einflussfaktoren *siehe auch*
Human Factors 55, 113

Z

- ZEGA50, 79, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89,
93, 288
- Zeitliche Inkonsistenz28
- ZELGAT50, 79, 87, 88, 89, 93, 288
- Zellulärer Automat . I, 2, 50, 79, 80, 81, 89,
90, 94, 95
- Zielaufklärung.....I, 49, 107, 133, 243, 245,
246, 249, 250
- Zielauswahl.... 33, 111, 112, 129, 133, 138,
144, 212, 215, 254
- Zug *siehe auch Militärische*
Hierarchieebenen 16, 22, 51, 75, 76,
101, 129
- Zustandsübergangsgraph 68