

Dissertation

Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Anpassung an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Universität der Bundeswehr München
Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse (Erstprüfer)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby (Zweitprüfer)
Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle (Drittprüfer)

vorgelegt von

Timo Heinisch (M.Eng.)

München 2010

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema: Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Anpassung an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft

Verfasser: Timo Heinisch (M.Eng.)

Promotionsausschuss

Vorsitzender Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert
Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

1. Berichterstatter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse
Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Professur für Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz

2. Berichterstatter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby
Universität der Bundeswehr München
Institut für Verkehrswesen und Raumplanung
Professur für Raumplanung und Mobilität

3. Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle
Präsident des Bayerischen Landesamt für Umwelt

Tag der Prüfung 15.06.2010

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)



Heinisch, Timo (M.Eng.)

Neubiberg, den 28.01.2010

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwesen und am Institut für Verkehrswesen und Raumplanung an der Universität der Bundeswehr München. Mein besonderer Dank gilt daher Prof. Dr.-Ing. Markus Disse und Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby, die es mir ermöglichten, diese Dissertation zu erstellen. Über zwei Jahre hinweg konnte ich an verschiedenen Forschungsprojekten und in der Lehre mitarbeiten und dadurch wichtige Erkenntnisse gewinnen, die für das Anfertigen dieser Dissertation von hohem Wert waren. Auch für die Betreuung, die nützlichen Tipps und die vielen konstruktiven Diskussionen möchte ich mich bedanken. Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle bedanken, der die Aufgabe des Drittprüfers übernahm. Trotz seines arbeitsintensiven Postens als Präsident des Landesamtes für Umwelt in Bayern fand er Zeit, die Arbeit zu betreuen und wertvolle Hinweise zu geben.

Der Dank des Autors gilt weiter dem Umweltbundesamt (UBA) für die freie Verfügbarkeit der im Rahmen dieser Dissertation verwendeten Daten, die auf dem Forschungsprojekt „WASKlim“ (UFOPLAN 2007, FKZ 3707 41 105) aufbauen (SCHERZER et al. 2010). Daher sind Überschneidungen zu dem genannten Projekt unumgänglich. Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn PD Dr. Achim Daschkeit und Frau Corinna Hornemann bedanken, die auf Seiten des Umweltbundesamtes das Projekt betreuten. Gleicher Dank gilt auch dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, das als Auftraggeber des WASKlim Projektes diese Dissertation überhaupt erst ermöglichte.

Des Weiteren möchte ich mich bei unseren Projektpartnern bedanken. Dies waren zum einen das Consultingbüro für Umweltschutz und Datenanalyse UDATA mit dem Geschäftsführer und Projektleiter Herrn Dr. Jörg Scherzer und seiner Mitarbeiterin Frau Dr. Hannaleena Pöhler und zum anderen die gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung DIALOGIK, mit dem Geschäftsführer Prof. Dr. Ortwin Renn und seinen Mitarbeiterinnen Frau Viola Schetula und Frau Marlen Schulz.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Kollegen an der Universität bedanken, die mich sowohl aus fachlicher Sicht durch konstruktive Diskussionen als auch auf privater Ebene sehr gut unterstützten und ermutigten.

Schlussendlich gilt mein besonderer Dank meiner Familie, meinen Freunden und meiner Frau für ihre großartige Unterstützung.

Kurzfassung

Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel stellen ein sehr aktuelles und in den Medien sehr präsentenes Themenfeld dar. In der vorliegenden Arbeit hat sich der Verfasser im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), betreut durch das Umweltbundesamt (UBA), dieser Thematik angenommen und ein neues Entscheidungsunterstützungssystem, das den Namen „WASKlim-EUS“ erhielt, entwickelt. Mit Hilfe des neuen Systems können für ein bestimmtes Einzugsgebiet mögliche zukünftige Zustände ausgewählter Wassernutzungen unter Berücksichtigung des Klimawandels aufgezeigt werden. Anhand verschiedener Anpassungsmaßnahmen und deren Bewertung durch Stakeholder kann zudem eine festgelegte Anpassungsstrategie umgesetzt werden. Das System beruht u.a. auf den Methoden der Fuzzy-Logik, des Analytischen-Hierarchie-Prozesses (AHP) und der Nutzwertanalyse (NWA).

Hierzu wurden die Grundlagen der Thematik Klimawandel und dessen meteorologische und hydrologische Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in Deutschland im Allgemeinen und auf verschiedene Wassernutzungen im Speziellen dargestellt. Die daraus entstandene Notwendigkeit eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, geht klar hervor. Das Konzept des neu entwickelten WASKlim-EUS, das aus einem vierstufigen Aufbau von Kenngrößenermittlung, Zustandsbewertung, Maßnahmenbewertung bis hin zur Wahl der Anpassungsstrategie mit Maßnahmenprogramm reicht, wurde erläutert und die verwendeten Methoden ausführlich beschrieben. Anhand dreier mesoskaliger Testgebiete wurde das neue EUS in seiner praktischen Anwendung erprobt. Hierzu wurden Nutzerkonferenzen und Stakeholderbefragungen durchgeführt und ausgewertet. Für das Einzugsgebiet der Wupper zeigte sich Handlungsbedarf für die Bereiche Wasserkraftanlagen, Kühlwasseraus- und -einleitungen und Fischerei. Im Einzugsgebiet der Salza wurden alle betrachteten Wassernutzungen als vulnerabel identifiziert. Der Gewässerzustand allgemein, die Fischerei und die Abwassereinleitungen aus Kläranlagen konnten im Einzugsgebiet der Oberen Iller als handlungsbedürftig erfasst werden. Darüber hinaus wurde die Qualität und Sensitivität der Ergebnisse diskutiert und weiterer Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Abstract

Water management adaption strategies due to climate change are a very prevailing topic which is often discussed in the media. In the work at hand, the author has treated this subject within the research project of the Federal Ministry of Environment (BMU), Nature Protection and Reactor Safety – coached by the Federal Environment Agency (UBA) – and has developed a new decision support system (DSS), named „WASKlim-EUS“. With the aid of this new system possible future situations of selected water uses – for certain drainage areas - can be demonstrated, taking into account climate change. On the basis of different adaption measures and their evaluation by stakeholders a defined adaption strategy can be implemented. The DSS is based on the methods of fuzzy-logic, the analytic hierarchical process and the utility analysis.

Therefore the basis of the climate change and the meteorological and hydrological effects on the water management in Germany in general and on different water uses in particular were explained. Hence the exigency to develop a adaption strategy clearly emerges.

The concept of the newly developed WASKlim-EUS - which in a four step configuration ranges from the identification of parameters, the evaluation of current states and measures to the election of the adaption strategy with the according program of measures – was described and the used methods were explained in detail.

By means of three mesoscale study areas the new DSS was put into practice. For the purpose user conferences and stakeholder interviews were carried out and evaluated. For the Wupper catchment need of action was indicated for the sectors of water power plants, cooling water output and input and fishery. For the catchment area of the Salza all considered water uses were identified as vulnerable. For the catchment area of the Upper Iller, need of action was detected for the water situation in general, the fishery and the effluent from sewage treatment plants. Furthermore the quality and sensitivity of the results were discussed and further requirements for development were shown.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Kurzfassung	vii
Abstract	viii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xxi
1. Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	1
1.3 Gliederung der Arbeit	2
2. Klimawandel - Auswirkungen und Strategien für die Wasserwirtschaft	3
2.1 Klimamodelle	3
2.1.1. Globale Klimamodelle	3
2.1.2. Klimaszenarien	7
2.1.3. Regionalisierungsverfahren („Downscalingmethoden“)	12
2.2 Ergebnisse der Regionalisierungsverfahren für Deutschland	14
2.2.1. Lufttemperatur	15
2.2.2. Niederschlag	16
2.2.3. Klimatische Wasserbilanz	18
2.3 Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen für Deutschland	23
2.3.1. Einzugsgebiet der Donau	24
2.3.2. Einzugsgebiet der Elbe	24
2.3.3. Einzugsgebiet der Ems	25
2.3.4. Einzugsgebiet der Oder	26
2.3.5. Einzugsgebiet des Rheins	26
2.3.6. Einzugsgebiet der Weser	28
2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Wassernutzungen	29
2.4.1. Wasserversorgung	29
2.4.2. Wasserkraft	30
2.4.3. Binnenschifffahrt	31
2.4.4. Ökologischer Gewässerzustand	32
2.5 Internationale und nationale Anpassungsstrategien an den Klimawandel	33
3. Entwicklung und beispielhafte Anwendung des WASKlim-EUS	37
3.1 Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS)	37
3.1.1. Definition von EUS	37
3.1.2. Vorhandene EUS in der Wasserwirtschaft	38
3.1.3. Anforderungen an das neue EUS	41
3.1.4. Verfügbare Daten für das neue EUS	41
3.1.5. Abgrenzung des neuen EUS von vorhandenen Systemen	42

3.2	Konzept des WASKlim-EUS	43
3.2.1.	Kenngrößenermittlung.....	45
3.2.2.	Zustandsbewertung.....	48
3.2.3.	Maßnahmenbewertung	51
3.2.4.	Anpassungsstrategie mit Maßnahmenprogramm	52
3.3	Baustein: Wasserhaushaltsmodell – WaSiM-ETH.....	54
3.3.1.	Modellkonzept.....	54
3.3.2.	Einsatzbereiche von WaSiM-ETH	56
3.3.3.	Eignung von WaSiM-ETH für das WASKlim-EUS.....	56
3.4	Baustein: Regelungsmethodik – Fuzzy-Logik.....	58
3.4.1.	Fuzzy-Entscheidungssystem	60
3.4.2.	Beispiel Fuzzy-Logik „Wärmekraftanlagen“	70
3.4.3.	Einsatzbereiche von Fuzzy-Logik	75
3.4.4.	Eignung von Fuzzy-Logik für das WASKlim-EUS.....	76
3.5	Baustein: Multikriterielle Entscheidungsmodelle – AHP und NWA.....	77
3.5.1.	Analytischer-Hierarchie-Prozess (AHP)	78
3.5.2.	Beispiel AHP „Autokauf“	93
3.5.3.	Einsatzbereiche des AHP	95
3.5.4.	Eignung des AHP für das WASKlim-EUS	96
3.5.5.	Nutzwertanalyse (NWA).....	96
3.6	Stakeholderbeteiligung	97
3.7	Anwendungsbeispiel.....	98
3.8	Übertragbarkeit und Grenzen	108
3.9	Optionen zur Weiterentwicklung.....	109
4.	Anwendung des WASKlim-EUS in drei Testregionen	111
4.1	Auswahl der Testregionen	111
4.2	Datengrundlage.....	112
4.3	Eingangsdaten für das WASKlim-EUS.....	113
4.4	Testregion Wupper	113
4.4.1.	Beschreibung des Einzugsgebietes.....	113
4.4.2.	Hydrologische Belastung	115
4.4.3.	Vorhandene Wassernutzungen	118
4.4.4.	Ergebnisse des WASKlim-EUS	119
4.4.5.	Unsicherheiten.....	123
4.5	Testregion Salza.....	124
4.5.1.	Beschreibung des Einzugsgebietes.....	124
4.5.2.	Hydrologische Belastung	125
4.5.3.	Vorhandene Wassernutzungen	129
4.5.4.	Ergebnisse des WASKlim-EUS	130
4.5.5.	Unsicherheiten.....	133
4.6	Testregion Obere Iller.....	134
4.6.1.	Beschreibung des Einzugsgebietes.....	134
4.6.2.	Hydrologische Belastung	135
4.6.3.	Vorhandene Wassernutzungen	139
4.6.4.	Ergebnisse des WASKlim-EUS	139
4.6.5.	Unsicherheiten.....	143
4.7	Qualität und Sensitivität der Ergebnisse.....	143
4.8	Optimierungsmöglichkeiten und kritische Betrachtung des WASKlim-EUS.....	144
5.	Zusammenfassung und Ausblick	146

Literaturverzeichnis	151
Anhang.....	167
A.1. Kohlendioxidkonzentrationen der SRES-Szenarien	167
A.2. Klimatische Wasserbilanzkarten	168
A.2.1. Niederschlagskorrektur nach Richter.....	168
A.2.2. Berechnung der Verdunstung nach Penman-Monteith.....	169
A.2.3. Berechnung der prozentualen Änderung der klimatischen Wasserbilanz	169
A.2.4. Klimatische Wasserbilanzkarten.....	170
A.3. Expertenbefragung	176
A.4. WASKlim-EUS Eingabedaten und Ergebnisse.....	196
A.4.1. Bevölkerungsentwicklung	196
A.4.2. Testregion Wupper	198
A.4.3. Testregion Salza / Weida	203
A.4.4. Testgebiet Obere Iller	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des IPCC-Klimamodells (ECHAM 5 / MPI-OM) (MPI-M 2006)	4
Abbildung 2.2: Horizontale Auflösung verschiedener Generationen dreidimensionaler Klimamodelle (KEUP-THIEL & WUNRAM 2007).....	5
Abbildung 2.3: Änderung der globalen Temperaturentwicklung mit und ohne Aerosole (MENZEL 2004).....	5
Abbildung 2.4: Grundstruktur der IPCC-SRES Emissionsszenarios (ZEBISCH et al. 2005)....	7
Abbildung 2.5: CO ₂ -Konzentration der jeweiligen Szenarien (KASANG 2009).....	9
Abbildung 2.6: Änderung der mittleren globalen Lufttemperatur (bezogen auf den Wert von 1990) nach den Emissionsszenarios des IPCC (KLIWA 2006)	9
Abbildung 2.7: Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur aus dem langjährigen Mittel 1961-1990 (KLIWA 2009).....	10
Abbildung 2.8: CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre vom Jahr 1000 bis zum Jahr 2100 in Abhängigkeit der SRES-Szenarios (IPCC 2001b).....	11
Abbildung 2.9: Atmosphärische CO ₂ -Konzentration und Änderung der globalen Mitteltemperatur der letzten 400.000 Jahre (KROPP et al. 2009)	12
Abbildung 2.10: Änderung der mittleren Lufttemperatur im Sommer getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)	15
Abbildung 2.11: Änderung der mittleren Lufttemperatur im Winter getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)	16
Abbildung 2.12: Änderung der mittleren Niederschlagshöhen im Sommer getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)	17
Abbildung 2.13: Änderung der mittleren Niederschlagshöhen im Winter getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)	17
Abbildung 2.14: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2021-2050 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [mm].....	20
Abbildung 2.15: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2071-2100 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [mm].....	21
Abbildung 2.16: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2071-2100 zu 2021-2050, WETTREG, A1B [mm]	22
Abbildung 2.17: Flussgebietseinheiten in Deutschland (UBA 2005)	23
Abbildung 3.1: Rahmenbedingungen der Wasserwirtschaft (KADEN & KALTOFEN 2004) ...	43

Abbildung 3.2: Aufbauschema des Entscheidungsunterstützungssystems WASKlim-EUS.....	44
Abbildung 3.3: Modellkette Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen	45
Abbildung 3.4: Graphische Darstellung der Bewertung der hydrologischen Kenngrößen.	50
Abbildung 3.5: Zusammenfassendes Aufbauschema des WASKlim-EUS.....	53
Abbildung 3.6: Modellstruktur von WaSiM-ETH (SCHULLA & JASPER 1998).....	55
Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen Wasser- und Lufttemperatur (SCHIFFLER et al. 2008).....	57
Abbildung 3.8: Fuzzy-Entscheidungssystem (~ unscharfe Regelung) (in Anlehnung an LIPPE 2006 und TRAEGER 1994).....	60
Abbildung 3.9: Begriffsdefinitionen Fuzzy-Mengen.....	61
Abbildung 3.10: Umwandlung von linguistischen Begriffen in Fuzzy-Mengen.....	62
Abbildung 3.11: Fuzzifizierung linguistischer Begriffe	62
Abbildung 3.12: Minimum-Operator einer UND-Komposition zweier Fuzzy-Mengen	64
Abbildung 3.13: Maximum Operator einer ODER-Komposition zweier Fuzzy-Mengen	64
Abbildung 3.14: Minimum-Implikation	65
Abbildung 3.15: Produkt-Implikation.....	66
Abbildung 3.16: Maximum-Aggregation	67
Abbildung 3.17: Summen-Aggregation.....	68
Abbildung 3.18: Defuzzifizierung "Maximum-Mittelwert-Methode"	69
Abbildung 3.19: Defuzzifizierung "Schwerpunkt-Methode"	69
Abbildung 3.20: Fuzzy-Entscheidungslogik am Beispiel einer Wärmekraftanlage.....	70
Abbildung 3.21: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 1	71
Abbildung 3.22: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 2.....	72
Abbildung 3.23: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 3 und 4.....	73
Abbildung 3.24: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 5 und 6.....	74
Abbildung 3.25: Typische Fuzzy-Funktionsweise	75
Abbildung 3.26.: Einteilung von Multi-Criteria-Entscheidungen in Anlehnung an HWANG & YOON (1981), NITZSCH (1992) und DVWK (1989).....	78
Abbildung 3.27: Hierarchiebildung im AHP	80
Abbildung 3.28: Fließdiagramm zum AHP (in Anlehnung an REICHARDT 2003; MEIXNER & HAAS 2002).....	81
Abbildung 3.29: Vergleich verschiedener Bewertungsskalen (in Anlehnung an WEBER 1993).....	83
Abbildung 3.30: Evaluationsmatrix E (in Anlehnung an MEIXNER & HAAS 2002; REICHARDT 2003)	84
Abbildung 3.31: Hierarchiebildung im AHP am Beispiel „Autokauf“	93
Abbildung 3.32: Fuzzy-Logik Regelwerk für die hydrologischen Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“	102
Abbildung 3.33: Fuzzy-Logik Regelwerk für die hydrologischen Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ und ein synthetisches Klimaszenario incl. Auswertung	103

Abbildung 3.34: Fuzzy-Logik Regelwerk für die hydrologischen Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) der „TW aus GW“ und ein synthetisches Klimaszenario incl. Auswertung und Gewichtung (GWN (J) = 25 %; GWN (S) = 75 %).	104
Abbildung 4.1: Lage der Testgebiete (SCHERZER et al. 2010)	112
Abbildung 4.2: Einzugsgebiet der Wupper (WUPPERVERBAND 2008)	114
Abbildung 4.3: Walter-Lieth-Klimadiagramm der Klimastation Leverkusen der Zeitreihe 1961-1990, Datenquelle DWD (2010)	115
Abbildung 4.4: Hydrologische Belastung MHQ für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)	116
Abbildung 4.5: Hydrologische Belastung MQ für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)	116
Abbildung 4.6: Hydrologische Belastung MNQ für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)	117
Abbildung 4.7: Hydrologische Belastung GWN für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)	117
Abbildung 4.8: Zustandsbewertung Wupper 2021-2050 gegenüber 1971-2000	120
Abbildung 4.9: Zustandsbewertung Wupper 2071-2100 gegenüber 1971-2000	121
Abbildung 4.10: Einzugsgebiet Salza (BAH BERLIN 2009)	124
Abbildung 4.11: Bereich süßer See und ehemaliger salziger See (EVSA 2009)	125
Abbildung 4.12: Walter-Lieth-Klimadiagramm der Klimastation Halle (Kroellwitz) der Zeitreihe 1961-1990 , Datenquelle DWD (2010)	126
Abbildung 4.13: Hydrologische Belastung MHQ für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)	127
Abbildung 4.14: Hydrologische Belastung MQ für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)	127
Abbildung 4.15: Hydrologische Belastung MNQ für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)	128
Abbildung 4.16: Hydrologische Belastung GWN für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)	128
Abbildung 4.17: Zustandsbewertung Salza 2021-2050 gegenüber 1971-2000	131
Abbildung 4.18: Zustandsbewertung Salza 2071-2100 gegenüber 1971-2000	131
Abbildung 4.19: Einzugsgebiet der Oberen Iller bis Kempten	134
Abbildung 4.20: Walter-Lieth-Klimadiagramm der Klimastation Kempten (WEWA) der Zeitreihe 1961-1990 , Datenquelle DWD (2010)	135
Abbildung 4.21: Hydrologische Belastung MHQ für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)	136
Abbildung 4.22: Hydrologische Belastung MQ für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)	137
Abbildung 4.23: Hydrologische Belastung MNQ für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)	137
Abbildung 4.24: Hydrologische Belastung GWN für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)	138
Abbildung 4.25: Zustandsbewertung Obere Iller 2021-2050 gegenüber 1971-2000	140
Abbildung 4.26: Zustandsbewertung Obere Iller 2071-2100 gegenüber 1971-2000	140
Abbildung 5.1: Aufbauschema des WASKlim-EUS	148

Abbildungen im Anhang:

Abbildung A 1: Klimatische Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 1971-2000, WETTREG, Kontrolllauf C20 [mm].....	170
Abbildung A 2: Klimatische Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2021-2050, WETTREG, A1B [mm].....	171
Abbildung A 3: Klimatische Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2071-2100, WETTREG, A1B [mm].....	172
Abbildung A 4: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), 2021-2050 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [%]	173
Abbildung A 5: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), 2071-2100 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [%]	174
Abbildung A 6: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), 2071-2100 zu 2021-2050, WETTREG, A1B [%]	175
Abbildung A 7: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland – Varianten (Daten aus: STATISTISCHES BUNDESAMT 2006)	196
Abbildung A 8: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2050, Variante 1 - W1 (Daten aus: STATISTISCHES BUNDESAMT 2006)	197

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auswahl globaler Klimamodelle (DWD 2009)	6
Tabelle 2.2:	Auswahl regionaler Klimamodelle (DWD 2009)	14
Tabelle 3.1:	Übersicht verwendeter hydrologischer Kenngrößen.....	46
Tabelle 3.2:	Übersicht verwendeter Entwicklungskenngrößen.....	47
Tabelle 3.3:	Beispiel für die Bewertung der hydrologischen Kenngröße MQ.....	49
Tabelle 3.4:	Vergleich der verschiedenen Fuzzy-Inferenz Methoden	75
Tabelle 3.5:	Charakteristische Unterscheidungen der Entscheidungsmodelle bei Einpersonenentscheidungen (verändert nach SCHNEEWEIB 1991).	77
Tabelle 3.6:	9-Punkte Bewertungsskala (Intervallskala) nach Saaty für die Paarvergleiche (HAEDRICH et al. 1986).....	82
Tabelle 3.7:	Umgekehrte Relation der Bewertungsskala (MEIXNER & HAAS 2002)	83
Tabelle 3.8:	AHP-Gewichtung, Alternativskalen (WEBER 1993)	83
Tabelle 3.9:	Evaluationsmatrix der Ober- und Unterkriterien für das Beispiel „Autokauf“	84
Tabelle 3.10:	Gewichtungsberechnung der AHP-Methode (Eigenvektorverfahren).....	87
Tabelle 3.11:	Berechnung der Gewichte nach dem Standardverfahren des AHP.....	87
Tabelle 3.12:	Evaluationsmatrix (EV0)	88
Tabelle 3.13:	Quadrierte Evaluationsmatrix (EV1)	88
Tabelle 3.14:	Differenz der Gewichte von EV1 zu EV0.....	89
Tabelle 3.15:	Erneut quadrierte Evaluationsmatrix (EV2).....	89
Tabelle 3.16:	Differenz der Gewichte von EV2 zu EV1.....	89
Tabelle 3.17:	Berechnung der „Durchschnittsmatrix“ und der Eigenwerte λ_i (REICHARDT 2003; MEIXNER & HAAS 2002)	90
Tabelle 3.18:	Mögliche Random Indizes (R)	91
Tabelle 3.19:	Evaluationsmatrix (EV0)	92
Tabelle 3.20:	Evaluationsmatrix Oberkriterien (EV2).....	93
Tabelle 3.21:	Evaluationsmatrix Unterkriterien – Kosten (EV0)	93
Tabelle 3.22:	Evaluationsmatrix Unterkriterien – Verbrauch (EV0).....	93
Tabelle 3.23:	Quantitative Bewertung der Alternativen	94
Tabelle 3.24:	Evaluationsmatrix Alternativen – Anschaffungskosten (EV0).....	94
Tabelle 3.25:	Evaluationsmatrix Alternativen – Unterhaltskosten (EV0)	94
Tabelle 3.26:	Evaluationsmatrix Alternativen – Leistung (EV0)	94
Tabelle 3.27:	Evaluationsmatrix Alternativen – Kraftstoff (EV0).....	94
Tabelle 3.28:	Evaluationsmatrix Alternativen – Kohlendioxid (EV0)	95
Tabelle 3.29:	Übersicht über die Kriterien- und Alternativengewichtungen	95
Tabelle 3.30:	Anzahl der Paarvergleiche in Abhängigkeit der Kriterienanzahl	96
Tabelle 3.31:	Nutzwertanalyse verschiedener Alternativen, Bewertung: 0 = schlechtester Wert; 5 = bester Wert	97
Tabelle 3.32:	Bewertung der hydrologischen Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“	99

Tabelle 3.33:	Bewertung der hydrologischen Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“ .....99	99
Tabelle 3.34:	Bewertung der hydrologischen Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“ .....100	100
Tabelle 3.35:	Gewichtung der hydrologischen Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ mittels AHP- und holistischer Gewichtung (HG) .....100	100
Tabelle 3.36:	Gewichtung der hydrologischen Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“ mittels AHP- und holistischer Gewichtung (HG) .....101	101
Tabelle 3.37:	Gewichtung der hydrolog. Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“ mittels AHP- und holistischer Gewichtung (HG).....101	101
Tabelle 3.38:	Übertragung der Bewertungsskala in die AHP-Skala .....101	101
Tabelle 3.39:	Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen für das Beispiel .....103	103
Tabelle 3.40:	Zustandsbewertung der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ .....105	105
Tabelle 3.41:	Zustandsbewertung der Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“ .....105	105
Tabelle 3.42:	Zustandsbewertung der Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“ .....106	106
Tabelle 3.43:	Vergleich der AHP- und der holistischen Gewichtung (HG).....106	106
Tabelle 3.44:	Mögliche Anpassungsmaßnahmen incl. Herstell- und laufende Kosten.....107	107
Tabelle 3.45:	Maßnahmenbewertung der Wassernutzung.....107	107
Tabelle 4.1:	Vergleich der gemessenen hydrologischen Hauptwerte mit den berechneten Werten aus den Kontrollläufen der Regionalisierungsmodelle für das EZG der Wupper.....118	118
Tabelle 4.2:	Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzer im EZG der Wupper .....119	119
Tabelle 4.3:	Zusammenfassung Zustandsbewertung Wupper - Mittelwerte (roter Pfeil = negative Zustandsentwicklung, grüner Pfeil = positive Zustandsentwicklung, horizontal = unklare Zustandsentwicklung) .....121	121
Tabelle 4.4:	Maßnahmenbewertung im EZG der Wupper (fett = vulnerabel) .....122	122
Tabelle 4.5:	Selbsteinschätzung der Stakeholder im Einzugsgebiet der Wupper. Dazugehörige Fragen siehe Anhang A.3. (unsicher (1), ziemlich sicher (2) und sicher (3)) .....123	123
Tabelle 4.6:	Vergleich der gemessenen hydrologischen Hauptwerte mit den berechneten Werten aus den Kontrollläufen der Regionalisierungsmodelle für das EZG der Salza.....129	129

Tabelle 4.7:	Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzer im EZG der Salza (Weida)	130
Tabelle 4.8:	Prozentuale Änderung der hydrologischen Kenngröße MQ (J) in naher (Z 1: 2021-2050) und ferner Zukunft (Z 2: 2071-2100) zu IST (1971-2000)	132
Tabelle 4.9:	Zusammenfassung Zustandsbewertung Salza - Mittelwerte (roter Pfeil = negative Zustandsentwicklung, grüner Pfeil = positive Zustandsentwicklung, horizontal = unklare Zustandsentwicklung).....	132
Tabelle 4.10:	Maßnahmenbewertung im EZG der Weida (fett = vulnerabel)	133
Tabelle 4.11:	Selbsteinschätzung der Stakeholder im Einzugsgebiet der Salza / Weida (unsicher (1), ziemlich sicher (2) und sicher (3)).....	133
Tabelle 4.12:	Vergleich der gemessenen hydrologischen Hauptwerte mit den berechneten Werten aus den Kontrollläufen der Regionalisierungsmodelle für das EZG der Oberen Iller.....	138
Tabelle 4.13:	Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzer im EZG der Oberen Iller	139
Tabelle 4.14:	Zusammenfassung Zustandsbewertung Obere Iller - Mittelwerte (roter Pfeil = negative Zustandsentwicklung, grüner Pfeil = positive Zustandsentwicklung, horizontal = unklare Zustandsentwicklung).....	141
Tabelle 4.15:	Maßnahmenbewertung im EZG der Oberen Iller (fett = vulnerabel)	142
Tabelle 4.16:	Bewertung der Maßnahmen „2-ten Polder bauen“ und „Speicher für NW-Aufhöhung bauen“	142
Tabelle 4.17:	Selbsteinschätzung der Stakeholder im Einzugsgebiet der Oberen Iller (unsicher (1), ziemlich sicher (2) und sicher (3)).....	143

Tabellen im Anhang:

Tabelle A 1:	Kohlendioxidkonzentrationen (CO ₂ -Konzentration) in [ppm] nach den SRES-Szenarien (ISAM model reference) (IPCC 2010)	167
Tabelle A 2:	Abhängigkeit von ε und b von Niederschlagsart und Stationslage.....	168
Tabelle A 3:	Einteilung der Stationslage nach der mittleren langjährigen Windgeschwindigkeit.....	168
Tabelle A 4:	Übersicht Bevölkerungsentwicklung in Deutschland	197
Tabelle A 5:	Übersicht Klimaszenarien Wupper 1/2	198
Tabelle A 6:	Übersicht Klimaszenarien Wupper 2/2	199
Tabelle A 7:	Bewertung Wasserdargebot Wupper 1/2	199
Tabelle A 8:	Bewertung Wasserdargebot Wupper 2/2	200
Tabelle A 9:	Bewertung Wasserbedarf und Zustandsbewertung Wupper	200
Tabelle A 10:	Maßnahmenbewertung Wupper	201
Tabelle A 11:	Übersicht Zustandsbewertung Wupper	201
Tabelle A 12:	Kriteriengewichtung Wupper	202
Tabelle A 13:	Übersicht Klimaszenarien Salza	203
Tabelle A 14:	Bewertung Wasserdargebot Salza / Weida	204

Tabelle A 15:	Bewertung Wasserbedarf und Zustandsbewertung Salza / Weida	205
Tabelle A 16:	Maßnahmenbewertung Salza / Weida	205
Tabelle A 17:	Übersicht Zustandsbewertung Salza / Weida	206
Tabelle A 18:	Kriteriengewichtung Salza / Weida	206
Tabelle A 19:	Übersicht Klimaszenarien Obere Iller 1/2	207
Tabelle A 20:	Übersicht Klimaszenarien Obere Iller 2/2	208
Tabelle A 21:	Bewertung Wasserdargebot Obere Iller 1/2	208
Tabelle A 22:	Bewertung Wasserdargebot Obere Iller 2/2	209
Tabelle A 23:	Bewertung Wasserbedarf und Zustandsbewertung Obere Iller	209
Tabelle A 24:	Maßnahmenbewertung Obere Iller	210
Tabelle A 25:	Übersicht Zustandsbewertung Obere Iller	210
Tabelle A 26:	Kriteriengewichtung Obere Iller	211

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytischer-Hierarchie-Prozess
Bev.Entw.	Bevölkerungsentwicklung
BW	Brauchwasser
CI	Konsistenzindex
CR	Konsistenzrate
C20	Zeitraum 1971-2000, simulierte Werte aus dem Kontrolllauf von WETTREG
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DSS	Decision Support System
ESM	Earth System Model
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
EV	Evaluationsmatrix / Bewertungsmatrix
EZG	Einzugsgebiet
f	feucht
GCM	General Circulation Model
GW	Grundwasser
GWN	Grundwasserneubildungsrate
HG	Holistische Gewichtung (freie Gewichtung, ~ ganzheitliche Betrachtung, „aus dem Bauch heraus“)
HWS	Hochwasserschutz
IST	Zeitraum 1971-2000, simulierte Werte aus dem Kontrolllauf
J	Jahr
KG	Kenngrößen
KWB	Klimatische Wasserbilanz
L-Temp	Lufttemperatur
MADM	Multi Attribute Decision Making
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
Mess	Zeitraum 1971-2000, gemessene Werte
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MODM	Multi Objective Decision Making
MQ	Mittelwasserabfluss
MW	Mittelwert
NM7Q	niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von 7 aufeinanderfolgenden Tagen in Niedrigwasserabschnitten
NM21Q	niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von 21 aufeinanderfolgenden Tagen in Niedrigwasserabschnitten
NW	Niedrigwasser
NWA	Nutzwert-Analyse
OW	Oberflächenwasser
Ökon.Sw.	Ökonomischer Strukturwandel

ppm	parts per million
S	hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)
t	trocken
TS	Talsperren
tkm	Tonnenkilometer
TW	Trinkwasser
TWV	Trinkwasserversorgung
UZ < MNQ	Anzahl an Tagen pro Jahr, an denen der Abfluss kleiner als MNQ ist
W	hydrologisches Winterhalbjahr (November bis April)
WKA	Wasserkraftanlagen
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
W-Temp	Wassertemperatur
Z1	Zeitraum 2021-2100, nahe Zukunft
Z2	Zeitraum 2071-2100, ferne Zukunft

1. Einführung

In diesem Einführungskapitel werden die Problemstellung und die daraus resultierende Notwendigkeit eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Anpassung an den Klimawandel und die Zielsetzung der Arbeit dargelegt. Zudem wird die Gliederung der Arbeit vorgestellt.

1.1 Problemstellung

Seit der Entstehung der Erde verändert sich das Klima ständig (KROPP et al. 2009). Klimaveränderungen¹ können jedoch unterschiedliche Ursachen haben. Zahlreiche zyklische und nichtzyklische Prozesse und Ereignisse wirken auf das Erdklima ein und verstärken oder neutralisieren sich gegenseitig. Einige von diesen Einflussgrößen sind mittlerweile wissenschaftlich genau verstanden und allgemein akzeptiert, andere sind als grundsätzlicher Wirkungszusammenhang plausibel aber noch nicht quantifiziert, wieder andere sind aufgrund von guten Korrelationen der vermuteten Einflussgrößen mit bestimmten Klimadaten naheliegend. Neben natürlichen Faktoren kann auch der Mensch das Klima beeinflussen. So kam die „Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaveränderungen“ (Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz: IPCC), die den Stand der Wissenschaft im Auftrag der Vereinten Nationen zusammenfasst, zu dem Schluss, dass die Erwärmung der Erdatmosphäre seit Beginn der Industrialisierung hauptsächlich durch die Anreicherung von Treibhausgasen durch den Menschen hervorgerufen wird (IPCC 2007).

Unter dem Begriff Klimaschutz werden Maßnahmen verstanden, die einer anthropogen verursachten globalen Erwärmung entgegen wirken und mögliche Folgen abmildern oder ganz verhindern sollen (Mitigation). Da der Klimawandel aus Sicht vieler Experten jedoch bereits nicht mehr völlig gestoppt, sondern lediglich noch gemildert bzw. begrenzt werden kann, sind Anpassungsmaßnahmen an die Folgen der Klimaveränderung zwingend notwendig geworden (Adaptation). Jedoch wirkt sich der Klimawandel auf unterschiedlichste Bereiche aus, die in einem Gesamtkontext betrachtet werden müssen (ZEBISCH et al. 2005). Die Auswirkungen einer Klimaveränderung sind sehr komplex und meist nicht mit einfachen Mitteln fassbar.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher vom Verfasser ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) entwickelt, das den Prozess der Klimaanpassung erleichtert. Mit Hilfe des neuen Systems, das den Namen WASKlim-EUS bekam, können zukünftige Zustände ausgewählter Nutzungen in Abhängigkeit mehrerer Klimaszenarien ermittelt und entsprechende Anpassungsmaßnahmen eruiert werden. Die Beteiligung ausgewiesener Experten (Stakeholder) stellt dabei ein wesentlicher Bestandteil des neuen Systems dar.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Entsprechend den Ausführungen des vorherigen Abschnittes wird in dieser Arbeit ein neues Entscheidungsunterstützungssystem zur Anpassung an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft entworfen und aufgebaut. Die Ausrichtung der Arbeit wird dabei von den Zielen geleitet, ein EUS zu entwickeln, das auf andere Bereiche außerhalb der Wasserwirtschaft übertragbar ist und die Unsicherheiten in Bezug auf das zukünftige Wasserdargebot als

¹ Der Begriff Klimaveränderung bezeichnet eine Veränderung des Klimas über einen längeren Zeitraum.

auch auf den zukünftigen Wasserbedarf berücksichtigt. Das System wird exemplarisch dazu verwendet, die Vulnerabilität² dreier ausgewählter mesoskaliger Testgebiete aufzuzeigen, und mögliche Anpassungsmaßnahmen darzulegen. Es soll gezeigt werden, dass es Methoden gibt, die den Prozess der Klimaanpassung strukturieren und dadurch erleichtern können.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in insgesamt fünf Kapitel aufgeteilt. Im **ersten Kapitel** wird die Aufgabenstellung erläutert und die Zielsetzung beschrieben. Ebenso wird die Gliederung der Arbeit dargestellt.

Im **zweiten Kapitel** geht der Verfasser auf den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft ein. Hierzu werden verschiedene globale Klimamodelle aufgezeigt, relevante Downscaling-Verfahren erläutert und die IPCC-Klimaszenarien beschrieben. Im Weiteren folgt eine Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Lufttemperatur, den Niederschlag und die klimatische Wasserbilanz in Deutschland bis zum Jahr 2100. Die sich daraus ergebenden hydrologischen Änderungen werden getrennt nach den großen Flusseinzugsgebieten in Deutschland beschrieben. Wie sich der Klimawandel auf verschiedene Wassernutzungen - Wasserversorgung, Wasserkraft, Binnenschifffahrt und ökologischer Gewässerzustand - auswirkt, wird ebenfalls dargestellt. Als Folge daraus wurden internationale und nationale Anpassungsstrategien festgelegt, die abschließend in Kapitel zwei erläutert werden.

Das **dritte Kapitel** stellt den Kern der Arbeit dar. Hier werden das neu entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem (EUS), das den Namen „WASKlim-EUS“ erhielt, und die verwendeten Verfahren erläutert. Zu Beginn werden vorhandene Entscheidungsunterstützungssysteme in der Wasserwirtschaft aufgezeigt und die Anforderungen des neuen Systems definiert. Eine Abgrenzung zu vorhandenen Systemen wird durchgeführt. Im Weiteren wird das vierstufige Konzept des neuen Entscheidungsunterstützungssystems vorgestellt und die verwendeten Modelle und Verfahren (Fuzzy-Logik, AHP und NWA) erklärt. Durch verschiedene Beispiele wird das Konzept veranschaulicht. Hinzu kommt eine Beschreibung der benötigten Stakeholderbeteiligung, auf welcher das neue EUS beruht. Letztendlich wird auf eine mögliche Übertragbarkeit des neu entwickelten Systems auf andere Bereiche außerhalb der Wasserwirtschaft eingegangen und das Weiterentwicklungspotenzial dargestellt.

In **Kapitel vier** erfolgt die praktische Anwendung des neuen Systems anhand dreier ausgewählter Testregionen (Wupper, Salza, Obere Iller). Auf die Auswahl der Testgebiete wird eingegangen, die Datengrundlagen erläutert und die hydrologische Belastung in den Testregionen beschrieben. Mit Hilfe dieser Eingangsdaten und den Stakeholderbefragungen wird für jedes Testgebiet ein Entscheidungsunterstützungssystem aufgestellt und angewendet. Die Ergebnisse werden getrennt nach Einzugsgebieten dargestellt und mögliche Unsicherheiten erläutert. Letztendlich werden die Qualität und Sensitivität der Ergebnisse kritisch betrachtet und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Im letzten **Kapitel fünf** wird die gesamte Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Einsatzmöglichkeiten des neu entwickelten WASKlim-EUS gegeben.

² Unter Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel wird die Verwundbarkeit bzw. Anfälligkeit eines klimasensitiven Systems gegenüber klimatischen Veränderungen verstanden.

2. Klimawandel - Auswirkungen und Strategien für die Wasserwirtschaft

In diesem Kapitel werden ausgewählte globale Klimamodelle vorgestellt und verschiedene Downscalingverfahren erläutert. Anschließend werden die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelten SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios) anhand der unterschiedlichen Entwicklungs- und Emissionspfade der Menschheit, sowie die daraus abgeleiteten Treibhausgasemissionen beschrieben und die möglichen Konsequenzen daraus aufgezeigt. Darauf aufbauend werden Ergebnisse der Regionalisierungsmodelle gezeigt und die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in Deutschland erörtert. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf verschiedene Wassernutzungen in Deutschland werden dargelegt und anschließend sowohl internationale als auch nationale Anpassungsstrategien diskutiert.

2.1 Klimamodelle

Ein Klimamodell ist ein EDV-gestütztes Modell zur Berechnung und Projektion des Klimas für eine bestimmte Zeitreihe in der Zukunft. Die meisten Modelle basieren auf einem Meteorologiemodell, was auch zur numerischen Wettervorhersage verwendet wird. Für gewöhnlich werden diese Modelle für die Klimamodellierung erweitert. Meistens werden ein sogenanntes Ozeanmodell, ein Schnee- und Eismodell und ein Vegetationsmodell angekoppelt (KLIWA 2006). Zusammen ergeben sie dann ein Atmosphären-, ein Land- und ein Ozeanmodell. Der Begriff Klima wird als „Durchschnittswetter“ bezeichnet und bezieht sich, entgegen dem Begriff „Wetter“, auf eine größere Zeitspanne. In der Regel werden für Klimaszenarien eine oder mehrere Dekaden betrachtet. Der klassische, von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definierte Zeitraum beträgt 30 Jahre. Die dabei betrachteten Größen sind meistens die Oberflächenvariablen, wie Temperatur, Niederschlag und Wind. Hinzu kommen oft die relative Luftfeuchte sowie die Sonnenscheindauer (IPCC 2001a).

2.1.1. Globale Klimamodelle

Heutige globale Klimamodelle GCM (General Circulation Model) bestehen meist aus einem Atmosphären-, einem Landoberflächen- und einem Ozeanmodell. Diese dreidimensionalen miteinander gekoppelten Modelle werden auch als Zirkulations- oder Strömungsmodelle bezeichnet (Abbildung 2.1). Dabei wird in jedem Modell ein dreidimensionales Gitter über den Globus bzw. die Ozeane gespannt und an den Gitterpunkten die relevanten Klimaprozesse simuliert. Die Berechnung erfolgt anhand verschiedener Differenzialgleichungen. Beispielsweise ergibt sich die Variable Wind aus der Bewegungsgleichung basierend auf dem Impulserhaltungsgesetz. Das Gesetz der Massenerhaltung wird in Form der Kontinuitätsgleichung und der statischen Grundgleichung zur Berechnung des Luftdruckes verwendet. Die Energieerhaltung wird über den 1. Hauptsatz der Wärmelehre zur Berechnung der Temperatur herangezogen. Anhand der Gasgesetze ergibt sich die Gasgleichung zur Dichteberechnung. Die Strahlungsgleichung dient der Beschreibung der Strahlungsflüsse und der Wechselwirkung mit der Atmosphäre.

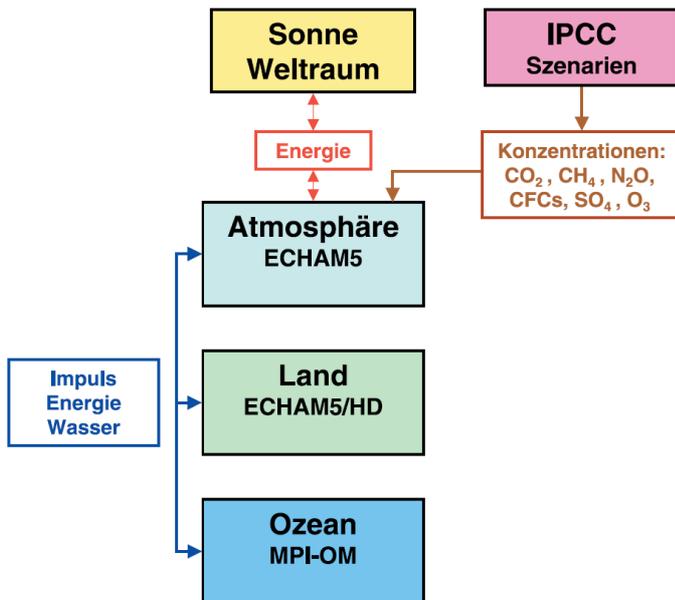


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des IPCC-Klimamodells (ECHAM 5 / MPI-OM) (MPI-M 2006)

Für die Lösung dieser Differenzialgleichungen müssen Anfangs- und Randbedingungen, wie beispielsweise die solare Einstrahlung, die Topographie der Erdoberfläche oder Albedoeigenschaften bekannt sein. Da die Gleichungen nicht exakt lösbar sind, kommen numerische Näherungsverfahren zum Einsatz, welche sich iterativ an die jeweilige Lösung annähern. Dieser Vorgang ist sehr rechenintensiv. Daher sind GCM mitunter die aufwendigsten Rechenmodelle, die derzeit weltweit existieren (MPI-M 2009).

Für die Validierung des Modells können aufgrund der Arbeitsweise von GCMs, keine räumlich und zeitlich explizierten Messungen verwendet werden, sondern lediglich die Statistik der Klimaelemente für eine bestimmte Zeitspanne. Ist die Übereinstimmung zufriedenstellend, kann das Klimamodell zur Simulation der Klimazustände früherer Zeiten oder auch für Klimamodellprojektionen der Zukunft eingesetzt werden.

Für die Simulation des künftigen Klimas, angetrieben durch beispielsweise Treibhausgaszenarien, muss das Klimamodell so lange gerechnet werden, bis die Statistik der Klimaelemente sich nicht mehr signifikant ändert. Dieser sogenannte Gleichgewichtszustand wird als Klimasignal bezeichnet. Das Klimasignal stellt die Differenz zwischen der Klimastatistik mit Störung (Änderung der Treibhausgaskonzentrationen) und dem Klimarauschen dar. Das Klimarauschen entspricht dabei der Klimastatistik ohne Störung durch die Änderung der Treibhausgaskonzentration. Dabei geht man davon aus, dass das Klimarauschen die natürliche Variabilität des Klimas wiedergibt (MENZEL 2004).

Um die enormen Rechenzeiten solcher Modelle beschränken zu können, wird die Rasterweite des Gitters relativ weitmaschig gewählt. Beispielsweise beträgt bei dem Atmosphären- und Landoberflächenmodell ECHAM 5 (European Center Hamburg) die horizontale Auflösung $1,875^\circ$, was einem Gitterabstand von etwa 180 km am Äquator entspricht (Abbildung 2.2). Das damit gekoppelte Ozeanmodell MPI-OM (Max Planck Institut – Ozean Modell) weist eine Rasterweite von $1,5^\circ$ auf, was einer Rasterweite von ca. 160 km am Äquator gleichkommt (ROECKNER et al. 2003 & SPEKAT et al. 2007).

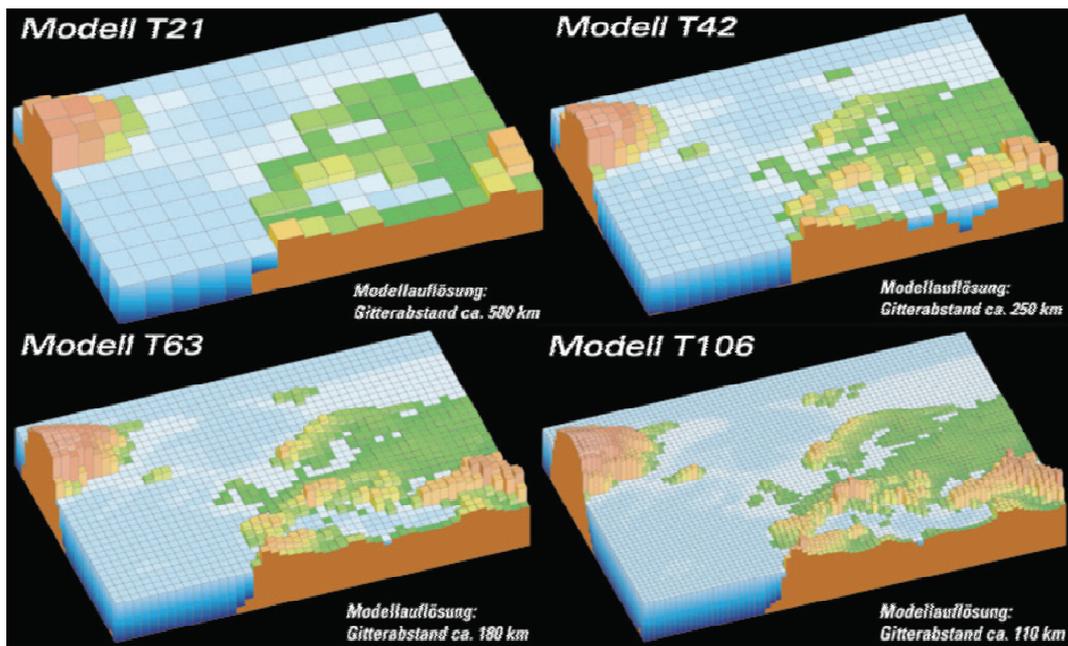


Abbildung 2.2: Horizontale Auflösung verschiedener Generationen dreidimensionaler Klimamodelle (KEUP-THIEL & WUNRAM 2007)

In vertikaler Richtung erfolgt ebenfalls eine Aufteilung in mehreren übereinander angeordneten Schichten (Tabelle 2.1). Beispielsweise wird die Atmosphäre im ECHAM 5 Modell mit 31 Schichten und die Ozeane im Modell MPI-OM mit 40 Schichten abgebildet (CRUEGER et al. 2007). Dadurch können die vertikalen Prozesse besser berücksichtigt werden.

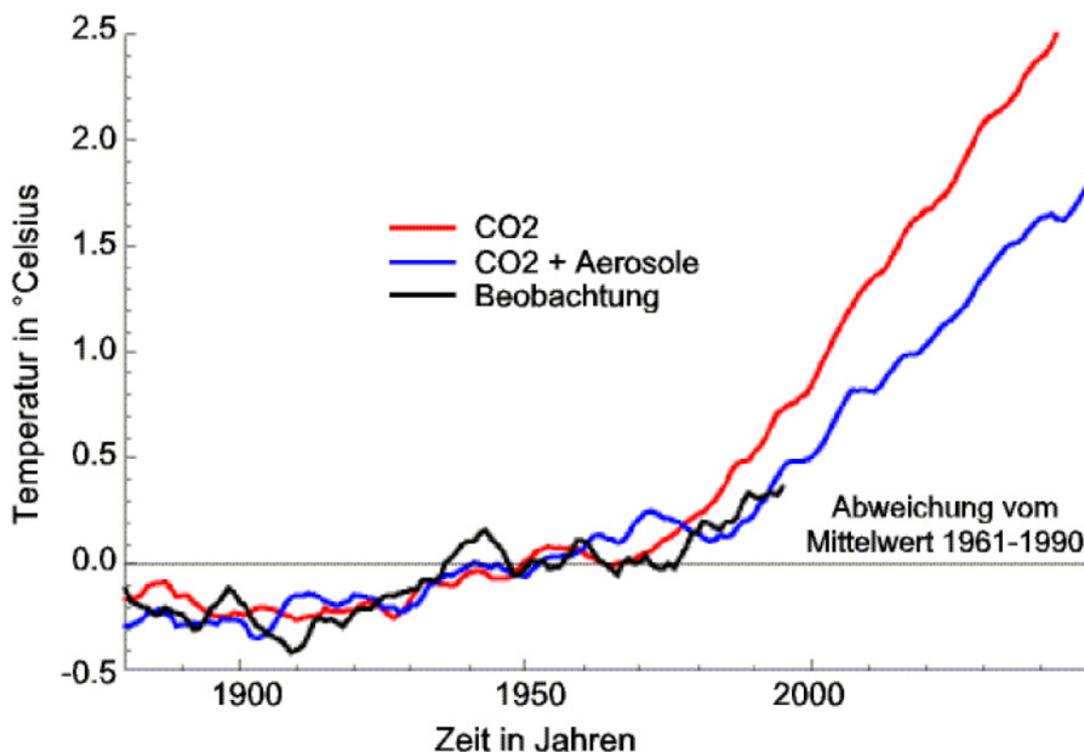


Abbildung 2.3: Änderung der globalen Temperaturentwicklung mit und ohne Aerosole (MENZEL 2004)

Die Bausteine der Grundstruktur (Abbildung 2.1) werden permanent weiterentwickelt, so dass bereits heute Modelle existieren, die beispielsweise eine detaillierte Simulation der Aerosolpartikel³ erlauben. In der heutigen Klimaforschung geht man davon aus, dass die Entwicklung der Temperatur sehr stark von Aerosolen abhängt. Die Abbildung 2.3 zeigt den Zusammenhang der Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von Kohlendioxid (CO₂) mit und ohne Aerosole. Darin ist zu erkennen, dass sich die Änderung der Temperaturentwicklung unter Berücksichtigung von Aerosolen besser an die Beobachtung angleicht als ohne Aerosole.

Die Kopplung der einzelnen Modelle zu einem Gesamtmodell wird als sogenanntes „Earth System Model (ESM)“ bezeichnet. Von der Max Planck Gesellschaft (MPG) wurde im Jahr 2003 das Modell „Community Earth System Models (COSMOS)“ in der Version 0 vorgestellt, welche neben den oben genannten ECHAM 5 und MPI-OM Modellen um zusätzlich Modelle wie beispielsweise das Aerosolmodell HAM-M7, das Atmosphärenchemie-Modell MECCA, das Landvegetationsmodell JSBACH oder das dynamische Ozeanbiogeochemie-Modell HAMOCC erweitert wurde. Mittlerweile wird an der Modellversion 2 gearbeitet, das u.a. ein erweitertes Atmosphärenchemie-Modell MESSy beinhaltet (CLAUSSEN 2009; COSMOS 2009a; COSMOS 2009b).

Bereits 1998 wurde am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, das Community Climate System Model (CCSM) vorgestellt, das ähnlich dem COSMOS Modell aus vielen Einzelkomponenten ein Earth System Model bildet (CCSM 2009).

Darüber hinaus existieren in den einzelnen Staaten verschiedene GCM. Beispielsweise in Japan das CCSR Modell (Center for Climate System Research), in Kanada das CGCM2 (Coupled Global Climate Model), in Australien das CSIRO-Mk2 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), in Princeton (USA) das GFDL Modell (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) oder in Großbritannien das HadCM3 (Hadley Coupled Model) bzw. die Weiterentwicklung HadGEM1 (Hadley Global Environment Model) (IPCC 2009). Die folgende Tabelle 2.1 zeigt eine Auswahl an GCM incl. deren Auflösung und vertikalen Schichtenanzahl.

Tabelle 2.1: Auswahl globaler Klimamodelle (DWD 2009)

Modell	Staat	Auflösung	Schichten
CGCM2	Kanada	3,8° x 3,8°	10
CSIRO Mk2	Australien	3,2° x 5,6°	9
GFDL R 30	USA	2,2° x 3,8°	14
HadCM3	Großbritannien	2,5° x 3,8°	19
NCAR DOE PCM	USA	2,8° x 2,8°	18
ECHAM 5	Deutschland	1,875° x 1,875°	31

³ Aerosole sind ein Gemisch aus festen und/oder flüssigen Schwebeteilchen in einem Gas.

2.1.2. Klimaszenarien

Im Jahre 1988 wurde vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (**I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange, kurz: **IPCC**) eingerichtet. Hauptaufgabe des IPCC ist es, über Risiken der anthropogen verursachten globalen Erwärmung zu informieren und geeignete Vermeidungsstrategien zu empfehlen. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, verwendet das IPCC bis zu 20 verschiedene GCM. Als Antrieb für die GCM und für die Simulation des zukünftigen Klimas auf der Erde sind jedoch sogenannte Klimaszenarien erforderlich, die mögliche zukünftige Entwicklungs- und Emissionspfade der Menschheit beschreiben. Da jedoch niemand genau vorhersagen kann, wie sich diese entwickeln, hat das IPCC im Jahre 2000 wirklichkeitsnahe „Modellgeschichten“ veröffentlicht. Diese sogenannten SRES-Szenarien (**S**pecial **R**eport on **E**mission **S**cenarios) beschreiben vier unterschiedliche Annahmen zur demographischen, ökonomischen, gesellschaftlichen und technologischen Entwicklung der Menschheit (A1, A2, B1, B2). Das A1-Szenario wurde dabei in drei Gruppen aufgeteilt, die sich im Wesentlichen durch unterschiedlichen Gebrauch fossiler Energieträger differenzieren (Abbildung 2.4). Aufgrund der Tatsache, dass Klimaszenarien auf verschiedenen Annahmen beruhen, stellen sie daher auch keine Prognosen dar, wie oft fälschlicherweise behauptet wird.

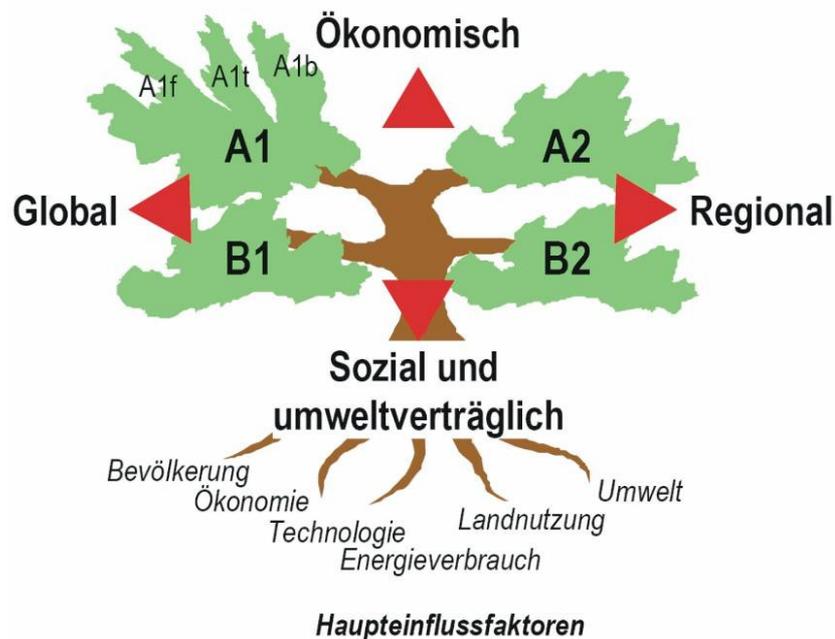


Abbildung 2.4: Grundstruktur der IPCC-SRES Emissionsszenarios (ZEBISCH et al. 2005)

Charakterisierung A1

Die A1 Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum. Die Weltbevölkerung wird bis Mitte des 21. Jahrhunderts ansteigen, gefolgt von einer Abnahme in der zweiten Hälfte. Neue und effiziente Technologien werden rasch eingeführt. Es erfolgt eine Annäherung von Regionen, eine Entwicklung von Handlungskompetenz sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktion. Die regionalen Unterschiede im Pro-

Kopf-Einkommen gehen zurück. Die A1 Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen des neuen Technologiewandels beschreiben: fossil-intensiv (A1FI), nicht-fossile Energieträger (A1T) und eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen (A1B). Diese Szenarien gehen von einer CO₂-Konzentration von rund 970 ppm für A1FI, rund 580 ppm für A1T und rund 720 ppm für A1B bis zum Ende des Jahrhunderts aus (Abbildung 2.5) (IPCC 2000; IPCC 2007).

Charakterisierung A2

Das A2 Szenario stellt eine sehr heterogene Welt dar, deren Staaten autark sind und lokale Identitäten bewahren. Die Bevölkerungszahl nimmt stetig zu und ist geprägt von einer überwiegend regionalen wirtschaftlichen Entwicklung. Das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und die technologischen Veränderungen sind langsamer und bruchstückhafter als in anderen Modellgeschichten. Die CO₂-Emissionen steigen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf ca. 850 ppm (IPCC 2000; IPCC 2007).

Charakterisierung B1

Die Bevölkerungszahl steigt bis Mitte des 21. Jahrhunderts und nimmt anschließend, ähnlich dem A1 Szenario, wieder ab. Wirtschaftliche Strukturen werden sich rasch in Richtung Dienstleistungs- und Informationswirtschaft verändern bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs. Saubere und ressourceneffiziente Technologien werden eingeführt. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts erfolgt ein Anstieg der CO₂-Emissionen, gefolgt von einer deutlichen Abnahme bis zum Jahr 2100 (ca. 550 ppm). Das Emissionsniveau im Jahr 2100 ist niedriger als bei A1B (IPCC 2000; IPCC 2007; UBA 2007).

Charakterisierung B2

Der Schwerpunkt liegt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Die Weltbevölkerung steigt stetig, jedoch langsamer als im A2 Szenario. Die wirtschaftliche Entwicklung ist weniger schnell und befindet sich auf mittlerem Niveau. Dafür entsteht ein vielfältigerer technologischer Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Umweltschutz und soziale Angleichung spielen in vielen Regionen, aber nicht überall eine wichtige Rolle in der Politik. Die CO₂-Emissionen steigen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts leicht an (CO₂-Anstieg auf ca. 620 ppm (IPCC 2000; IPCC 2007; ENDLICHER & GERSTENGARBE 2007).

Die Abbildung 2.5 zeigt die Entwicklung der CO₂-Konzentration der 6 SRES-Szenarien bis zum Jahr 2100 (siehe auch Anhang A.1.). Den stärksten CO₂-Anstieg weist das A1FI-Szenario auf (rd. 970 ppm). Daher wird dieses Szenario auch als „worst-case“ bezeichnet. Aus aktuellen Messungen ist bekannt, dass das momentane Emissionsprofil sogar leicht über dem A1FI Verlauf liegt (2008: gemessen 387 ppm, A1FI 385 ppm). Hinsichtlich einer Abschätzung der potenziellen Klimaauswirkungen ist dennoch das „mittlere“ A1B-Szenario ein guter Repräsentator (KROPP et al. 2009).

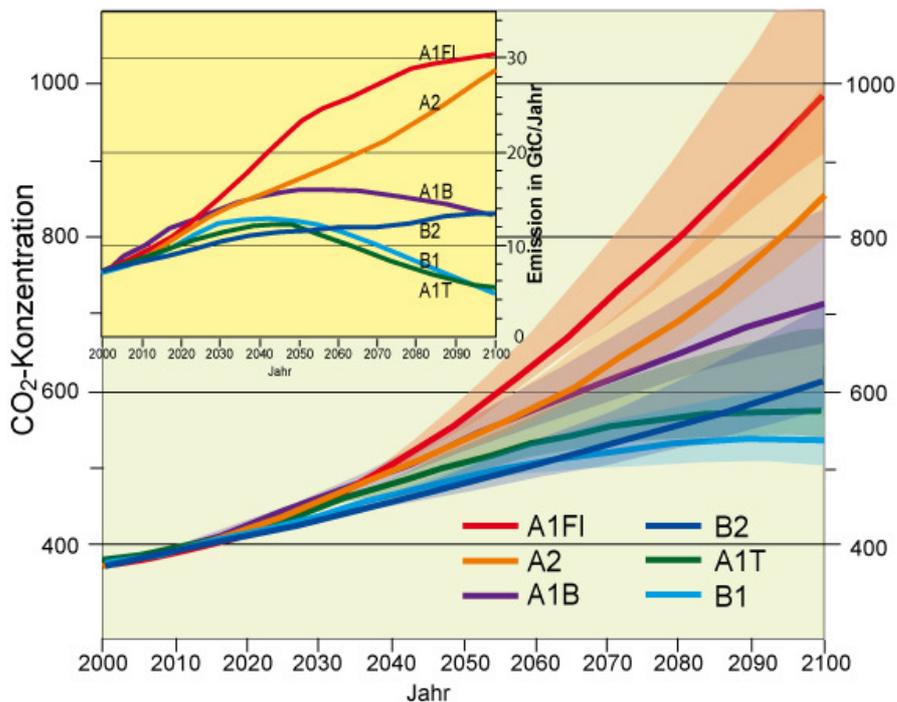


Abbildung 2.5: CO₂-Konzentration der jeweiligen Szenarien (KASANG 2009)

In Abbildung 2.6 sind die unterschiedlichen Temperaturänderungen der jeweiligen Szenarien abgebildet. Dargestellt sind auch die Szenarien IS92a, IS92c (tief) und das IS92e (hoch) des IPCC, welche auf älteren Annahmen aus dem Jahr 1992 basieren. Sie sind hier lediglich zum Vergleich aufgeführt, da der 1. und 2. Sachstandsbericht des IPCC mitunter darauf beruhen (HOUGHTON et al. 2001; ENDLICHER & GERSTENGARBE 2007; KLIWA 2006). Betrachtet man den Bereich der gemittelten Szenarien der SRES-Familien, beträgt die Temperaturerhöhung bis zum Ende des Jahrhunderts gegenüber dem Jahr 1990 zwischen 2,0 und 4,6 °C.

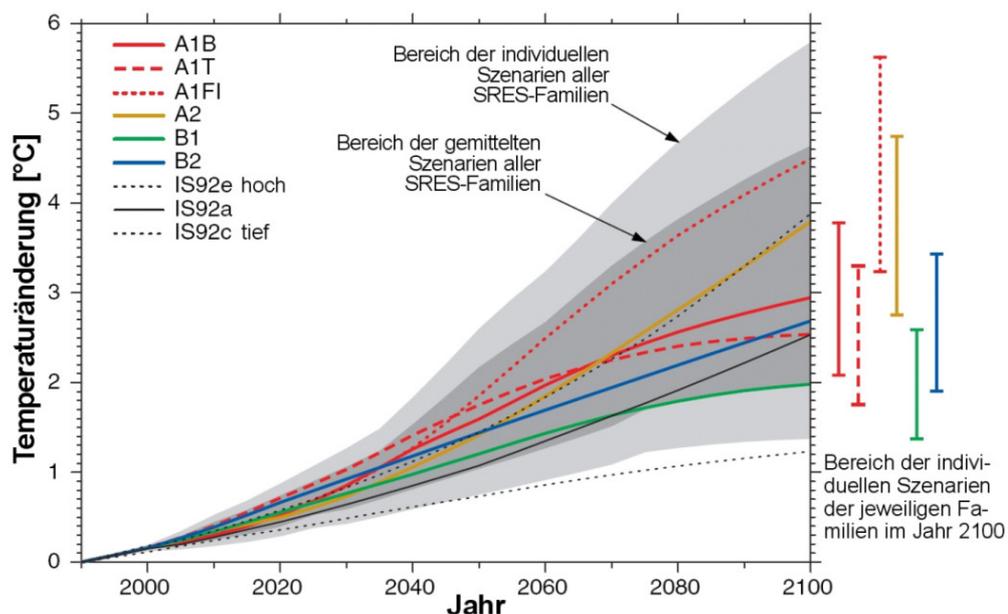


Abbildung 2.6: Änderung der mittleren globalen Lufttemperatur (bezogen auf den Wert von 1990) nach den Emissionsszenarien des IPCC (KLIWA 2006)

Zum Vergleich ist in Abbildung 2.7 die Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur aus dem langjährigen Mittel von 1961-1990 dargestellt. Die Graphik zeigt, dass bereits heute deutliche Temperaturänderungen festgestellt werden können.

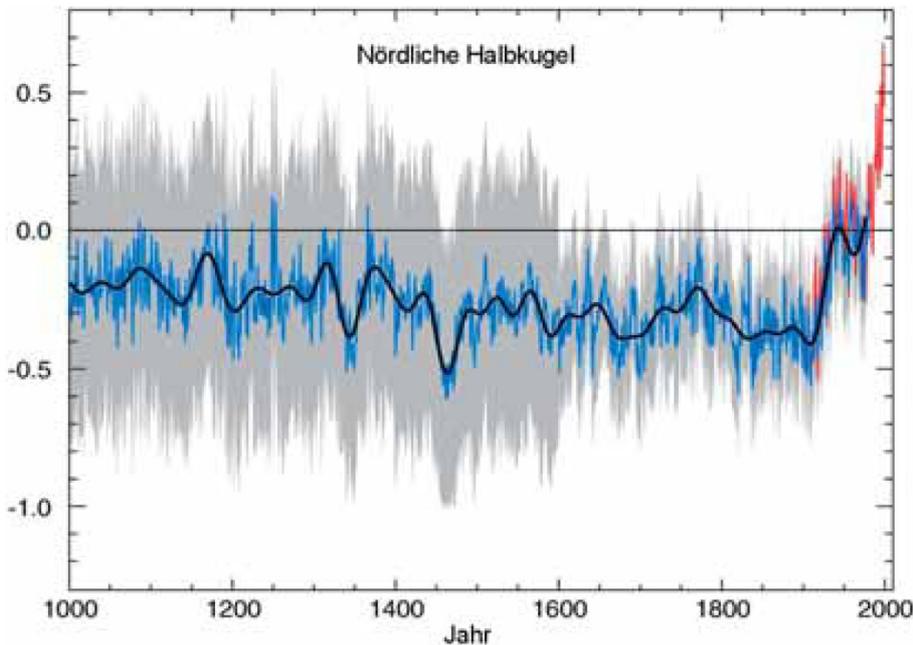


Abbildung 2.7: Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur aus dem langjährigen Mittel 1961-1990 (KLIWA 2009)

Dem natürlichen Treibhauseffekt ist die für Mensch und Natur angenehme globale Durchschnittstemperatur von rund $+15\text{ °C}$ zu verdanken. Die in der Erdatmosphäre vorkommenden Spurengase Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Ozon (O_3) wirken wie die Glasscheibe eines Gewächshauses. Kurzwellige Strahlung der Sonne gelangt durch diese Schicht - so wie auch durch eine Glasscheibe im Gewächshaus - auf die Erdoberfläche. Auf der Erdoberfläche wird die kurzwellige Strahlung durch Abkühlungsprozesse in langwellige Strahlung umgewandelt (Wiensches Verschiebungsgesetz) und von der Erdoberfläche zurückgestrahlt. Durch die Treibhausgase in der Atmosphäre, also die Glasscheibe, wird ein Teil der reflektierten langwelligeren Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung), die sonst in das Weltall entweichen würde, absorbiert und teilweise zur Erdoberfläche zurückgeschickt. Dadurch wird die Temperatur auf der Oberfläche, zusätzlich zu der durch kurzwellige Sonnenstrahlung entstandenen Erwärmung, erhöht. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt würde die Durchschnittstemperatur bei -18 °C liegen (MENZEL 2004).

Abbildung 2.8 zeigt die atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration vom Jahr 1000 bis zum Jahr 2000, welche aus Eiskerndaten und direkten Messungen erhoben wurden. Ab dem Jahr 2000 sind die Verläufe der SRES-Szenarien bis zum Jahr 2100 dargestellt. Betrag der durchschnittliche Wert weniger als 300 ppm in den letzten 1000 Jahren, so stieg dieser bereits zu Beginn des 20-ten Jahrhunderts über 300 ppm. Im Jahr 2008 betrug die CO_2 -Konzentration bereits ca. 387 ppm (UBA 2009). Alle SRES-Szenarien zeigen eine deutliche Zunahme der CO_2 -Konzentration gegenüber den letzten 1000 Jahren (IPCC 2001b).

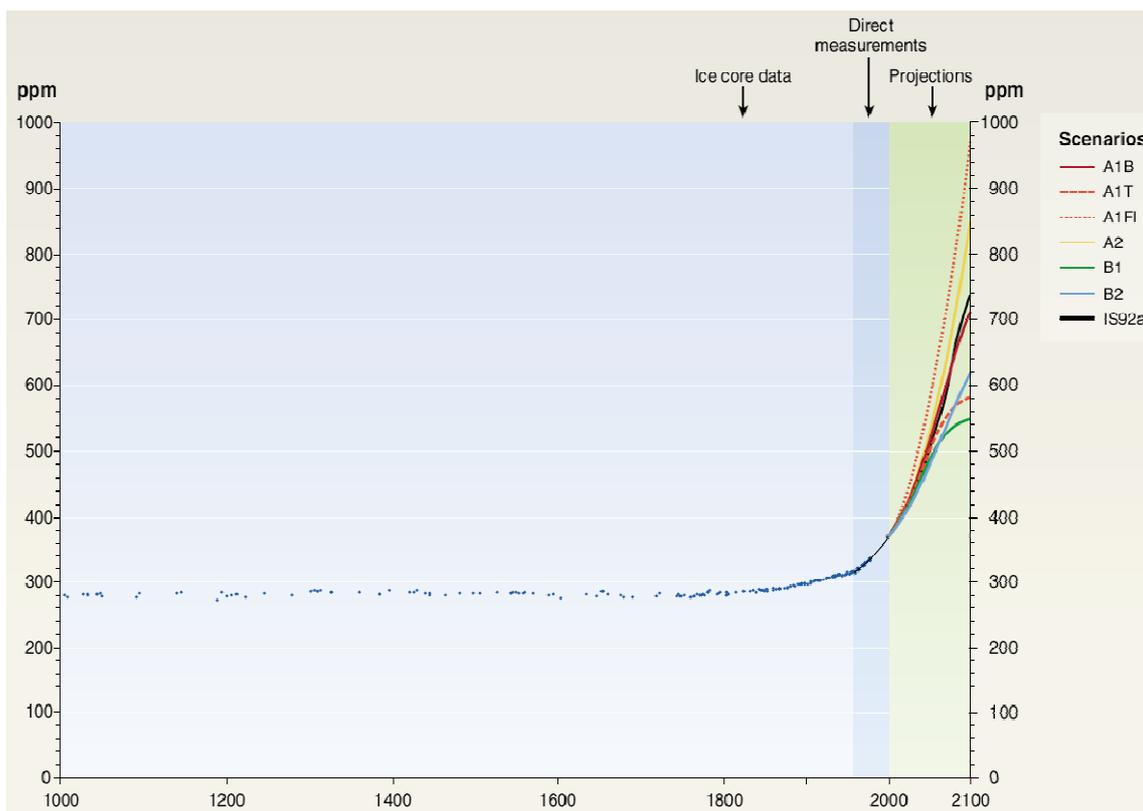


Abbildung 2.8: CO₂-Konzentration in der Atmosphäre vom Jahr 1000 bis zum Jahr 2100 in Abhängigkeit der SRES-Szenarien (IPCC 2001b)

In folgender Abbildung 2.9 ist der Zusammenhang zwischen der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration und der Temperaturänderung dargestellt. Die Zeitreihe reicht rund 400.000 Jahre in die Vergangenheit. Auch dieser Graphik ist zu entnehmen, dass die CO₂-Konzentration zu keinem Zeitpunkt über 300 ppm lag. Deutlich zu erkennen ist die Korrelation der bekannten Warmzeiten (Holozän, Eem, Holstein, Cromer, Waal) und der erhöhten Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre. Auf dieser Abhängigkeit beruhen die Annahmen einer zukünftigen Temperaturerhöhung. Allerdings ist diese Korrelation nicht allein aufgrund der CO₂-Konzentration kausal begründbar. Neben Kohlendioxid (CO₂) haben auch andere Treibhausgase wie Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (Lachgas, N₂O), halogenierte Treibhausgase, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Schwefelhexafluorid (SF₆), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) sowie in geringem Umfang in größeren Höhen durch den Flugverkehr emittierter Wasserdampf Einfluss auf die Temperaturerhöhung. Aerosole, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, welche in die Atmosphäre gelangen, haben insgesamt eine gegenläufige Wirkung zu den durch die Treibhausgase hervorgerufene Erwärmung (UBA 2009).

Hinzu kommen weitere Unsicherheiten wie die sogenannten Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (DANSGAARD et al. 2003). Dies sind rasante Klimaschwankungen, die anhand Eiskernbohrungen u.a. in Grönland nachgewiesen werden konnten. Dabei handelt es sich um Perioden schneller Erwärmung gefolgt von einer langsamen Abkühlung. Für den Zeitraum der Weichsel-Kaltzeit zwischen 110.000 und 23.000 Jahren vor unserer Zeit konnte dieser Effekt mehrfach nachgewiesen werden. Die Ursache hierfür ist jedoch noch nicht eindeutig geklärt.

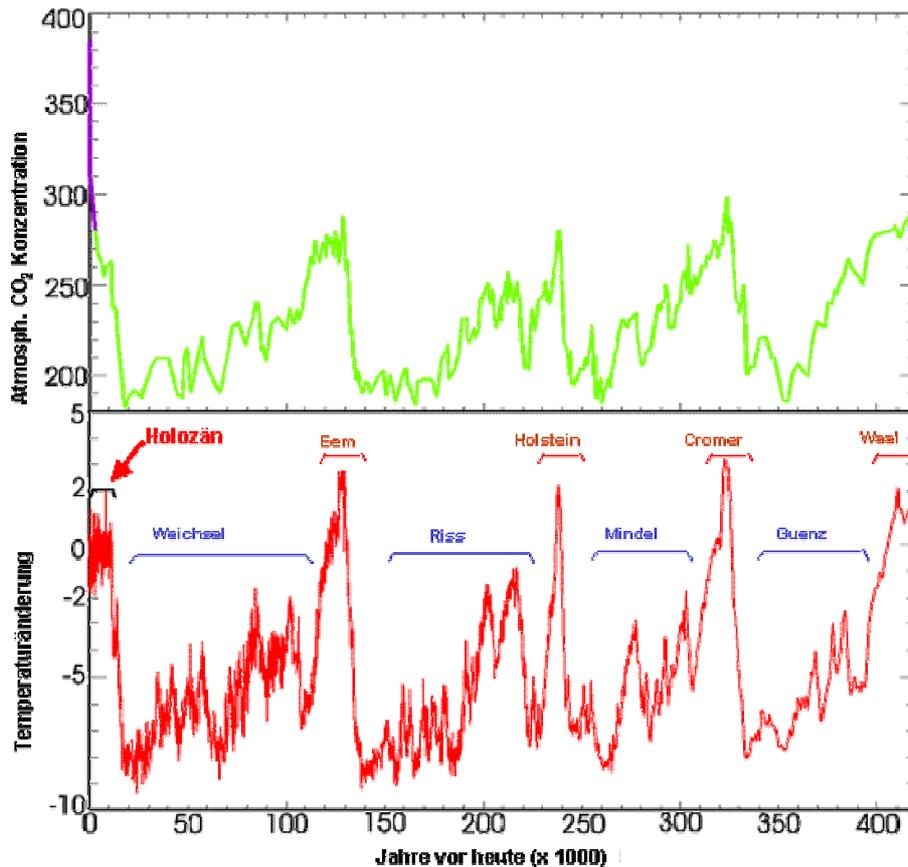


Abbildung 2.9: Atmosphärische CO₂-Konzentration und Änderung der globalen Mitteltemperatur der letzten 400.000 Jahre (KROPP et al. 2009)

2.1.3. Regionalisierungsverfahren („Downscalingmethoden“)

Globale Klimamodelle sind derzeit aufgrund des enormen Bedarfs an Rechenleistung nicht in der Lage, Daten hinreichender Qualität in einer horizontalen Auflösung von weniger als rund 200 x 200 km zur Verfügung zu stellen. Da dies für regionale hydrologische Fragestellungen in den meisten Fällen nicht genügt, wurden Regionalisierungsverfahren entwickelt. Die horizontale Auflösung dieser Verfahren beträgt ein Vielfaches einer GCM Auflösung. Dabei wird zwischen dynamischen regionalen Klimamodellen und statistischen Verfahren unterschieden (KLIWA 2006).

Dynamische Regionale Klimamodelle (RCM)

Diese Modelle basieren auf den gleichen Prinzipien wie GCM. Jedoch wird lediglich ein Ausschnitt auf der Erde mit einem feineren Gitter betrachtet. Für die Simulation benötigt man an den Rändern des Modellgebietes geeignete Randbedingungen. Diese werden von den globalen Zirkulationsmodellen übernommen. Durch die so genannte Nesting-Strategie (Einbetten in ein GCM) ist eine deutlich höhere räumliche Auflösung erzielbar (z.B. Rasterweite 10 km). Zudem können durch die Anpassung der physikalischen Vorgänge an das feinere Gitter komplexe Topografien oder auch Inhomogenitäten der Landoberfläche berücksichtigt werden. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass das Ergebnis einer „genesteten“ Simulation immer noch flächengemittelte Ergebnisse liefert (KLIWA 2006; BEIERKUHLEIN et al. 2008).

Statistische Verfahren

Bei diesen Verfahren werden statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Wetterlagen und den lokalen Auswirkungen identifiziert. Diese gewonnenen Beziehungen der Vergangenheit werden auf die globalen Klimamodelle der Zukunft übertragen. Dadurch können regionale Aussagen über die zukünftige Klimaänderung getroffen werden. Die horizontale Auflösung entspricht dabei nicht einem bestimmten Raster wie bei dynamischen Verfahren, sondern der räumlichen Verteilung vorhandener Klima- und Niederschlagsstationen. Bei der Verwendung dieser Verfahren wird angenommen, dass sich der physikalische Zusammenhang zwischen großräumigen Wetterlagen und lokalen Auswirkungen auch bei veränderten Klimabedingungen nicht unterscheidet (BEIERKUHNEIN et al. 2008; MENZEL 2004).

In Deutschland werden sowohl dynamische als auch statistische Verfahren verwendet. Zu den bekanntesten Vertretern der dynamischen Verfahren zählen die Modelle REMO und CLM. Bekannte statistische Verfahren sind WETTREG und STAR.

REMO

Das regionale Klimamodell REMO (**R**egional Climate **M**odelling) wurde vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelt und ist aus dem Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hervorgegangen (DWD 2009). Der Aufbau und die Methodik entsprechen dabei der eines GCM.

CLM

Das dynamische Klimamodell CLM (**C**limate **L**imited-area **M**odelling) wurde von einem Konsortium von 55 Institutionen entwickelt. Basis des Modells war das Lokalmodell des DWD. Aus dem CLM und dem Lokalmodell des DWD entwickelte sich mittlerweile die COSMO-Modellfamilie (**C**onsortium for **S**mall-**S**cale **M**odelling). Mit dieser Modellfamilie können sowohl Rechnungen für die Wettervorhersage (COSMO-EU, COSMO-DE) als auch für Klimaszenarien (COSMO-CLM) durchgeführt werden (DWD 2009).

WETTREG

Das statistische Modell WETTREG (**W**etterlagen-basierte **R**egionalisierungsmethode) wurde von der Firma CEC Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH entwickelt und basiert auf einer objektiven Wetterlagenklassifikation vergangener Zeitreihen und deren Übertragung in die Zukunft. Als Leitgrößen dienen Temperatur- und Niederschlagsänderungen aus den GCM (DWD 2009).

STAR

Das statistisch basierte regionale Klimamodell STAR (**S**tatistisches **R**egionalisierungsmodell) wurde am Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt. Bei diesem Verfahren wird mit Hilfe von Clusteranalysen ein Zusammenhang zwischen großräumigen generalisierten Klimainformationen und den Messreihen an einer Klimastation hergestellt. Die Temperaturänderung ist dabei die Leitgröße (DWD 2009).

Darüber hinaus existieren weitere regionale Klimamodelle. Folgende Tabelle 2.2 zeigt eine Auswahl an verschiedenen Modellen und ihrem Einsatzland, deren Auflösung und die vertikale Schichtenanzahl:

Tabelle 2.2: Auswahl regionaler Klimamodelle (DWD 2009)

Modell	Staat	Auflösung	Schichten
Arpege	Frankreich	50 - 70 km	31
CHRM	Schweiz	56 km	20
HadRM	Großbritannien	50 km	19
HIRHAM	Dänemark	50 km	19
MRI_JMA	Japan	20 km	31
PROMES	Spanien	50 km	28
RACMO	Niederlande	49 km	31
RCAO	Schweden	50 km	24
CLM	Deutschland	56 km	20
REMO	Deutschland	18 km	19
STAR	Deutschland	ca. 30 km	-
WETTREG	Deutschland	ca. 30 km	-

2.2 Ergebnisse der Regionalisierungsverfahren für Deutschland

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, existieren eine Vielzahl von globalen als auch von regionalen Klimamodellen und statistische Regionalisierungsverfahren. Hinzu kommen sechs unterschiedliche SRES-Klimaszenarien. Die Anzahl der möglichen Kombinationen daraus ist sehr groß. Aufgrund der enormen Rechenzeiten können daher nicht alle Modelle für alle Szenarien in den Untersuchungen berücksichtigt werden. In Deutschland werden bestimmte Modellketten derzeit bevorzugt. So werden vom Umweltbundesamt (UBA) beispielsweise das Globalmodell ECHAM 5 und die Regionalmodelle REMO und WETTREG unterstützt. Bei den SRES-Szenarien beschränkt man sich meist auf die A1B, A2 und B1 Szenarien, da sie zum einen eine große Bandbreite abdecken, mit Ausnahme des A1FI-Szenarios, und zudem als sehr wahrscheinlich gelten. Dabei wird das A1B Szenario als mittleres Szenario eingestuft. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat in einer umfangreichen Studie neben den REMO und WETTREG Verfahren das COSMO-CLM und das STAR Modell untersucht, allerdings beschränkt auf das A1B Szenario. Folgendes Unterkapitel bezieht sich daher auf die Modelle REMO, COSMO-CLM, WETTREG und STAR unter Annahme des mittleren Szenarios A1B.

A1B-Szenario

Das A1B Szenario ist geprägt von einer global orientierten Entwicklung mit starkem Wirtschaftswachstum, das u.a. auf der schnellen Einführung neuer und effizienter Technologien gegründet ist. Fossile und erneuerbare Energien werden gleichermaßen genutzt. Der Bevölkerungszuwachs wird bis Mitte des 21. Jahrhunderts ansteigen, gefolgt von einer Abnahme der Weltbevölkerung. Die CO₂-Emissionen erfahren bis Mitte des 21. Jahrhunderts noch einen leichten Anstieg, anschließend gehen diese bis zum Jahr 2100 leicht zurück (ca. 720 ppm).

Die folgenden Karten zur Lufttemperatur- und Niederschlagsänderung stammen vom Deutschen Wetterdienst. Sie fassen die getroffenen Aussagen zur klimatischen Belastung zusammen und geben einen deutschlandweiten Überblick über die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle REMO, CLM, WETTREG und STAR (DWD 2009). Für das Modell STAR liegen allerdings nur Ergebnisse bis zum Jahr 2055 vor. Ansonsten sind jeweils die Vergleichsperioden 2021-2050 zu 1971-2000 (oben) und 2071-2100 zu 1971-2000 (unten) angegeben.

2.2.1. Lufttemperatur

Die Abbildung 2.10 zeigt die Änderung der mittleren Lufttemperatur im Sommer. Dabei zeigt das Modell WETTREG eine deutlich geringere Erwärmung im Sommer als die anderen Klimamodelle. WETTREG rechnet bis zum Jahr 2050 mit einer Erwärmung um weniger als 1 °C und bis zum Jahr 2100 mit einer Erwärmung um weniger als 2,5 °C. Dagegen weisen die anderen Klimamodelle bis zum Jahr 2050 auf eine Erwärmung von bis zu 2,0 °C hin und bis zum Jahr 2100 sogar auf einen Temperaturanstieg um bis zu 5 °C. Die stärksten Erwärmungen sind im Südwesten und die mäßigsten Zunahmen im Nordosten von Deutschland zu erwarten.

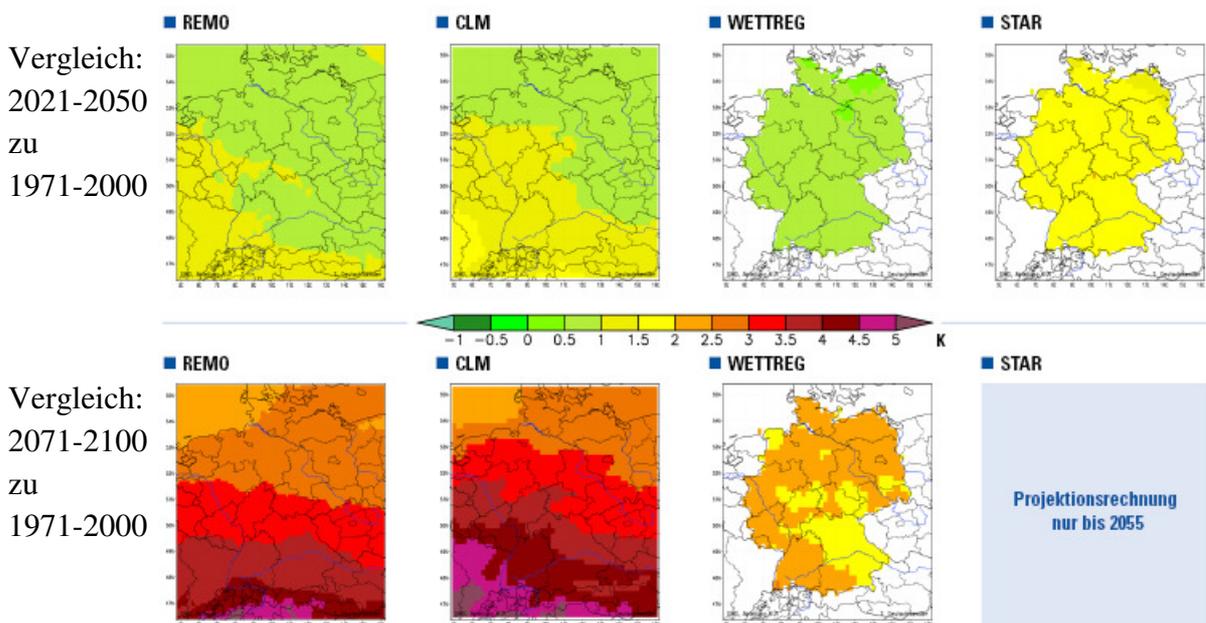


Abbildung 2.10: Änderung der mittleren Lufttemperatur im Sommer getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)

Die Abbildung 2.11 zeigt die mittlere Lufttemperatur im Winter. Hier stimmen alle untersuchten Klimamodelle recht gut überein. Es ist bis zum Jahr 2050 mit einem Temperaturanstieg zwischen 1,0 °C und 2,0 °C zu rechnen und bis zum Jahr 2100 mit einer Temperaturzunahme zwischen 3,0 °C und 5 °C.

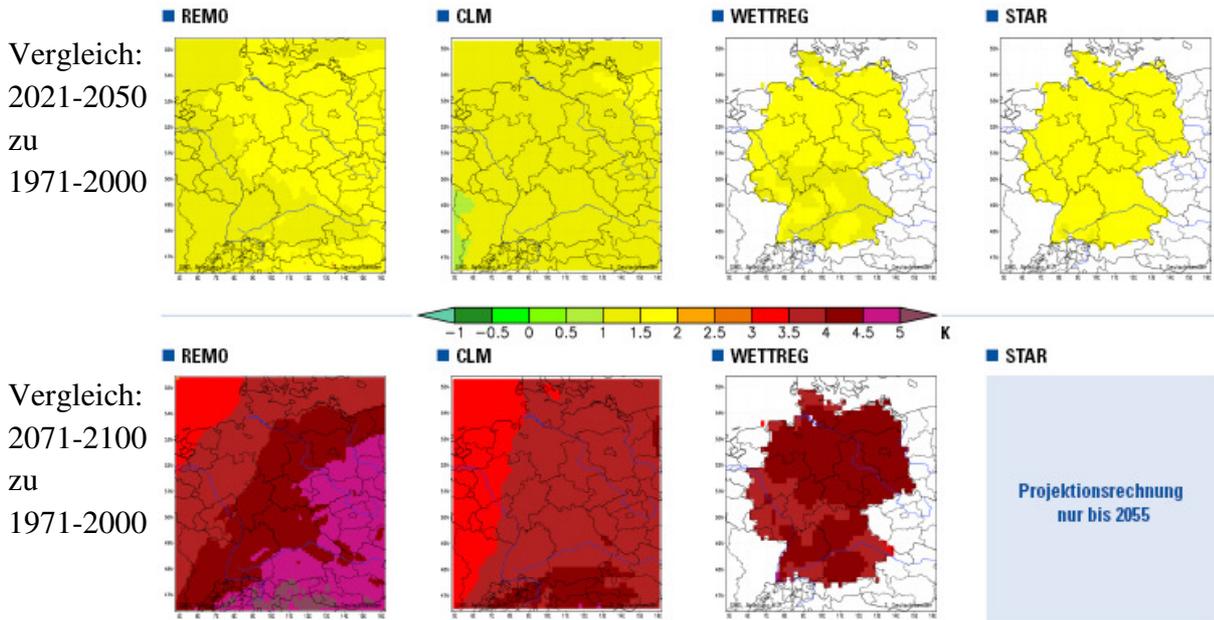


Abbildung 2.11: Änderung der mittleren Lufttemperatur im Winter getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)

2.2.2. Niederschlag

In Abbildung 2.12 ist die mittlere Niederschlagsänderung im Sommer dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Niederschläge im Sommer eher abnehmen. Lediglich das Modell REMO zeigt vereinzelt eine geringe Zunahme. Zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird es bis zu 15 % weniger Niederschlag im Sommer geben. Nach dem Modell STAR sogar bis zu 25 % weniger. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird der Trend fortgesetzt, so dass verbreitet ein Viertel weniger Niederschlag fällt, in einzelnen Regionen sogar bis zu 40 % weniger. Diese Auswirkungen werden verstärkt durch die ansteigenden Sommertemperaturen, die wiederum zu einem erhöhten Wasserbedarf führen. Zudem werden wahrscheinlich die Starkniederschläge zunehmen, d.h. ein größerer Anteil der Niederschlagshöhen wird innerhalb kurzer Zeit fallen. Als Folge daraus könnten zunehmend längere und häufigere Dürreperioden auftreten (DWD 2009).

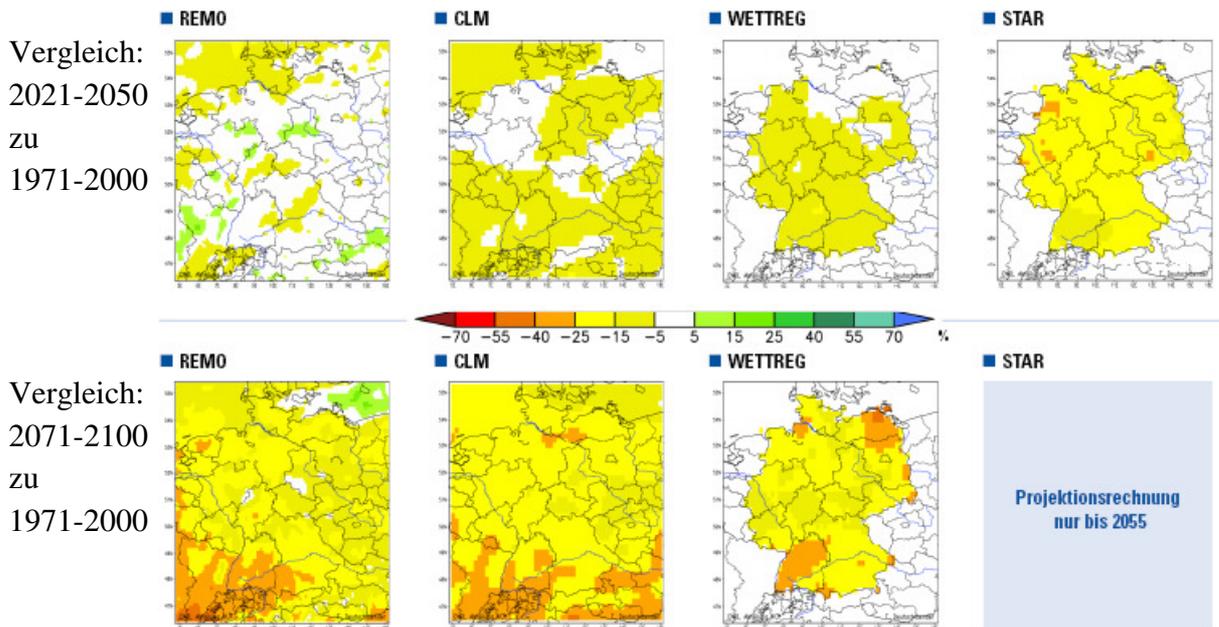


Abbildung 2.12: Änderung der mittleren Niederschlagshöhen im Sommer getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)

In Abbildung 2.13 ist eine Tendenz zu höheren mittleren Niederschlagshöhen im Winter zu erkennen, die insbesondere zum Ende des Jahrhunderts sehr deutlich wird. Bis zum Jahr 2050 ist dieser Trend lediglich im Modell WETTREG deutlich ersichtlich. Vor allem das Modell STAR weist in diesem Zeitraum sogar eher einen leichten Rückgang auf. Bis zum Ende des Jahrhunderts wurden von den Modellen REMO und CLM eine Niederschlagszunahme von bis zu 25 % errechnet und bei WETTREG sogar bis zu 70 % mehr Niederschlag.

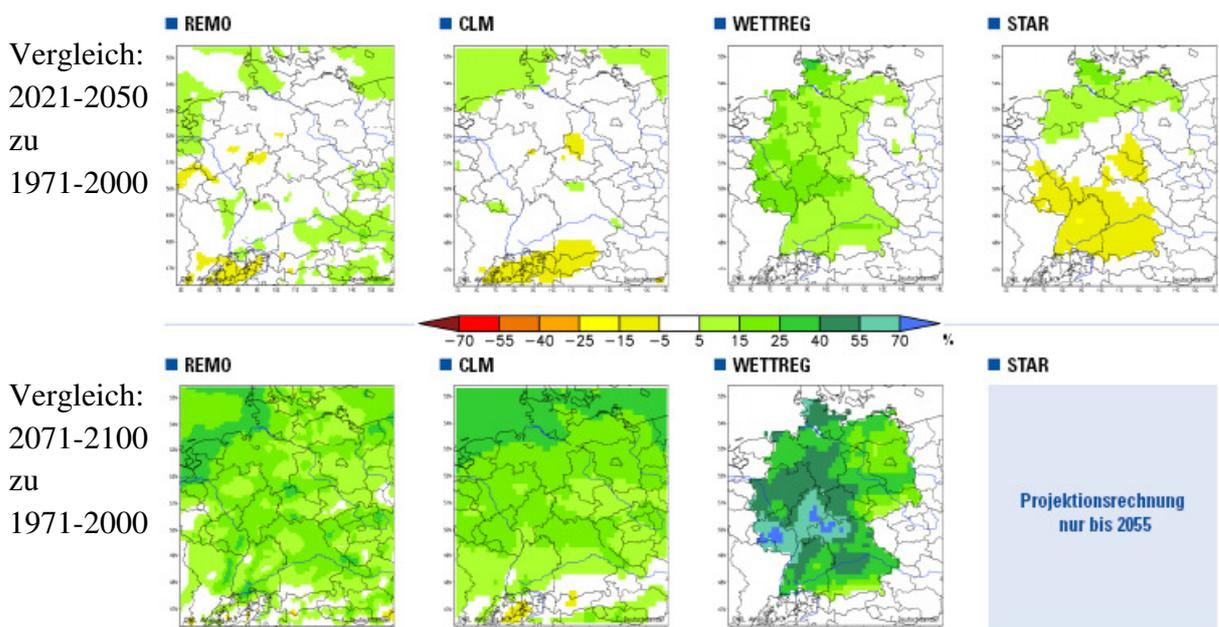


Abbildung 2.13: Änderung der mittleren Niederschlagshöhen im Winter getrennt nach verschiedenen regionalen Klimamodellen und den Perioden 2021-2050 und 2071-2100 (beide Szenario A1B) zu der Periode 1971-2000 (DWD 2009)

2.2.3. Klimatische Wasserbilanz

Die in vorangegangenen Kapiteln dargestellten Übersichtskarten geben Auskunft über die zukünftig zu erwartenden Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Um klimatische Brennpunkte im Hinblick auf die Wasserverfügbarkeit lokalisieren zu können, sind zusätzliche klimatische Wasserbilanzen erforderlich. Aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung wird dabei der lokale Wasserüberschuss bzw. das Wasserdefizit berechnet. Die potenziellen klimatischen Wasserbilanzen mit entsprechenden Karten wurden im Rahmen dieser Arbeit auf gleicher Datengrundlage wie oben erwähnte Übersichtskarten erstellt. Das Umweltbundesamt hat hierzu für ganz Deutschland einheitliche Klimadaten zur Verfügung gestellt. Verwendet wurde ebenfalls das Globalmodell ECHAM 5, das SRES-Szenario A1B und das Regionalmodell WETTREG für die Zeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100.

Um die statistische Sicherheit zu erhöhen, wurden für jede Dekade des gesamten Zeitraums 10 Realisierungen (Simulationen) berechnet. Dabei werden „über-,“ respektive „unternormal“ warme oder niederschlagsreiche (je nach Leitgröße) Witterungsabschnitte der Jetztzeit identifiziert und in Anomalien eingeteilt. Mit Hilfe eines Wettergenerators können daraus durch Kombination verschiedener positiver und negativer Anomalieperioden unterschiedliche Realisationen für eine Dekade erstellt werden. In jeder Realisierung befinden sich 7300 Tage (also 20 Jahre), die dem statistischen Verhalten des Klimas in der Dekade entsprechen. Im Gesamten wurden somit 200 Jahre für jede Dekade simuliert. Aus diesen Daten wurden 10-jährige Bereiche identifiziert, in denen der Niederschlag im Mittel besonders hoch (feucht), besonders niedrig (trocken) und durchschnittlich (normal) ist. Der 10-Jahresabschnitt, der dem Gesamtmittelwert am nächsten kommt, wurde dabei als durchschnittlich (normal) bezeichnet. Daher gibt es keine festen Grenzen, mit denen eine durchschnittliche Dekade definiert werden kann. Die Isolierung normaler Klimaverläufe muss dabei zwingend am 1. Januar beginnen, sonst wären z.B. Jahreszeitenuntersuchungen nicht möglich (SPEKAT et al. 2007). Für die folgenden Karten wurde die „normale“ Dekade verwendet.

Berechnung

Die klimatische Wasserbilanz ist als Differenz von korrigiertem Niederschlag (Anhang A.2.1.) und potenzieller Verdunstung (Anhang A.2.2.) definiert. Der Niederschlag wird in Niederschlags- und in Klimastationen gemessen. Jedoch werden lediglich in Klimastationen zusätzliche Daten für die Berechnung der potenziellen Verdunstung aufgenommen. Daher wurden ausschließlich Klimastationen für die Berechnung der Wasserbilanzkarten verwendet. In ganz Deutschland werden derzeit 282 Klimastationen unterhalten. Bei der Berechnung der Zukunftsszenarien konnten an 250 Messstationen brauchbare Daten erzeugt werden, die in die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz eingehen. Die Berechnung der potenziellen Verdunstung für Gras erfolgt, ähnlich dem hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU 2003), nach dem kombinierten Ansatz nach Penman-Monteith (DVWK 1996). Die potenzielle Verdunstung ist definiert als die Wassermenge, die ein optimal mit Wasser versorgter Rasen maximal verdunsten kann. Folgende Parameter werden in diesem Ansatz berücksichtigt:

- Windgeschwindigkeit (Tagesmittel)
- Relative Feuchte (Tagesmittel)
- Niederschlagssumme (Tag)
- Sonnenscheindauer (Tag)

Aus jeweils drei Dekaden mit je zehn Simulationsjahren (normal) werden Tagesmittelwerte bestimmt, die in die Berechnung der potenziellen Verdunstung eingehen. Mit Hilfe der berechneten potenziellen Verdunstung und des korrigierten Niederschlags kann die tägliche klimatische Wasserbilanz ermittelt werden. Die Niederschlagskorrektur erfolgt nach RICHTER (1995). Aus dem Vergleich Zukunft zu Vergangenheit können klimatische Brennpunktregionen lokalisiert werden. Die Kartendarstellung erfolgt getrennt nach Jahr, hydrologischem Sommer (Mai bis Oktober) und hydrologischem Winter (November bis April). Es werden die Mittelwerte der durchschnittlichen Klimadaten aus jeweils drei Dekaden von 1971-2000 (C20), 2021-2050 (Z1) und 2071-2100 (Z2) dargestellt. Eine Flächeninterpolation erfolgte aufgrund der vorhandenen Datenlage (Anzahl der Klimastationen) nicht. Weitere Karten sind im Anhang A.2.4. enthalten (absolute KWB in [mm] und Änderung in [%]).

Ergebnisse

In der nahen Zukunft (Abbildung 2.14) ist zu erkennen, dass nach der verwendeten Modellkette das Sommerhalbjahr zukünftig trockener wird und das Winterhalbjahr überwiegend feuchter. Ausnahmen stellen hier die östlichen Bundesländer dar. Dort werden auch teilweise die Winter trockener. Im Jahresdurchschnitt zeigt sich, dass es fast überall in Deutschland trockener wird.

In der fernen Zukunft (Abbildung 2.15) wird o.g. Trend noch deutlicher abgebildet. Die Sommermonate werden demnach klar trockener als heute und die Wintermonate mit wenigen Ausnahmen feuchter. Im Jahresdurchschnitt weisen vor allem die ostdeutschen Länder Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen als auch Baden-Württemberg und Südbayern einen signifikanten Rückgang der klimatischen Wasserbilanz auf.

Bei einem Vergleich der Dekaden 2071-2100 mit 2021-2050 fällt auf, dass es in der zweiten Jahrhunderthälfte Bereiche gibt, die wieder feuchter werden. Dies zeigt sich besonders in den Regionen Nordbayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen und teilweise in Niedersachsen (Abbildung 2.16).

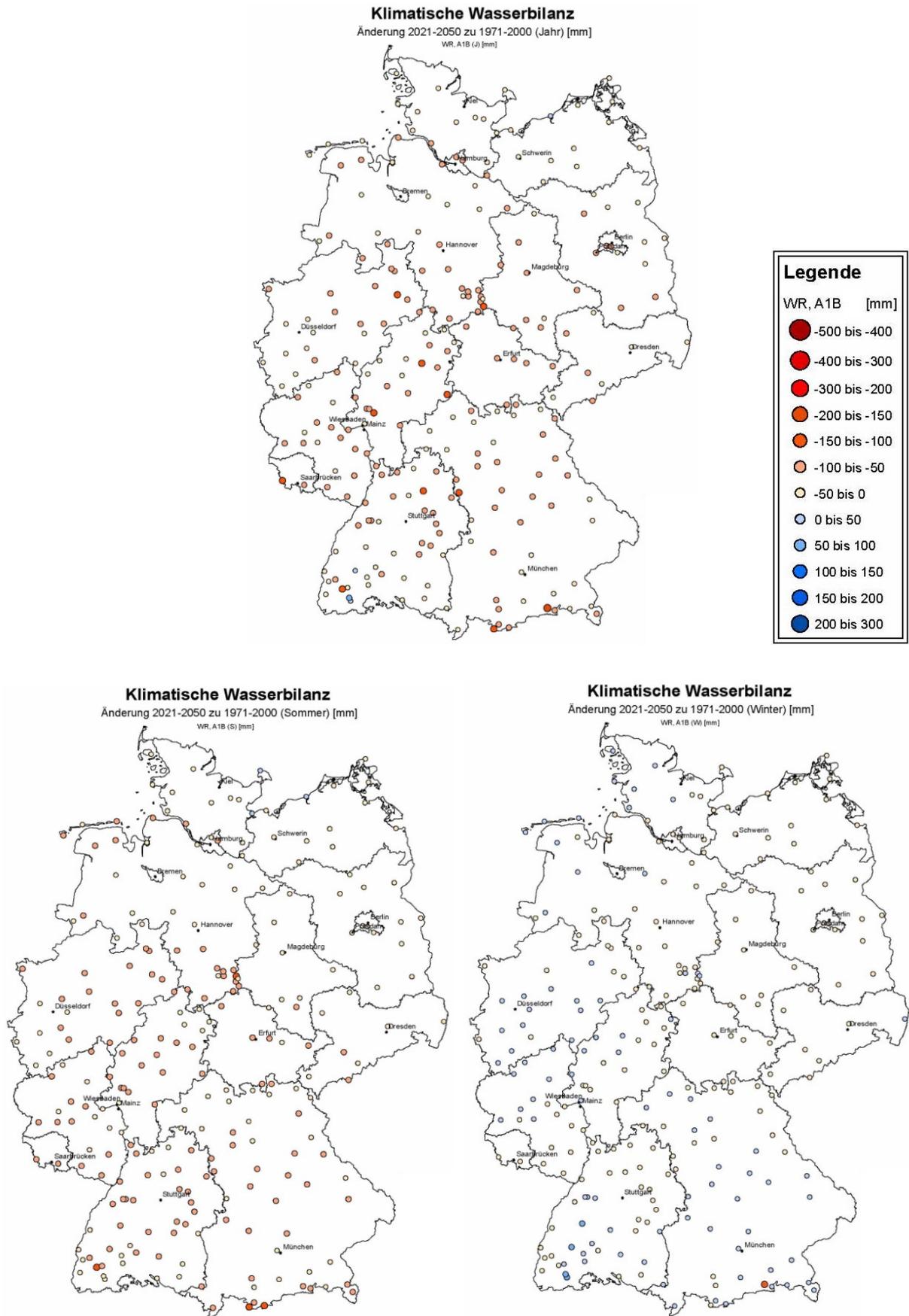


Abbildung 2.14: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2021-2050 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [mm]

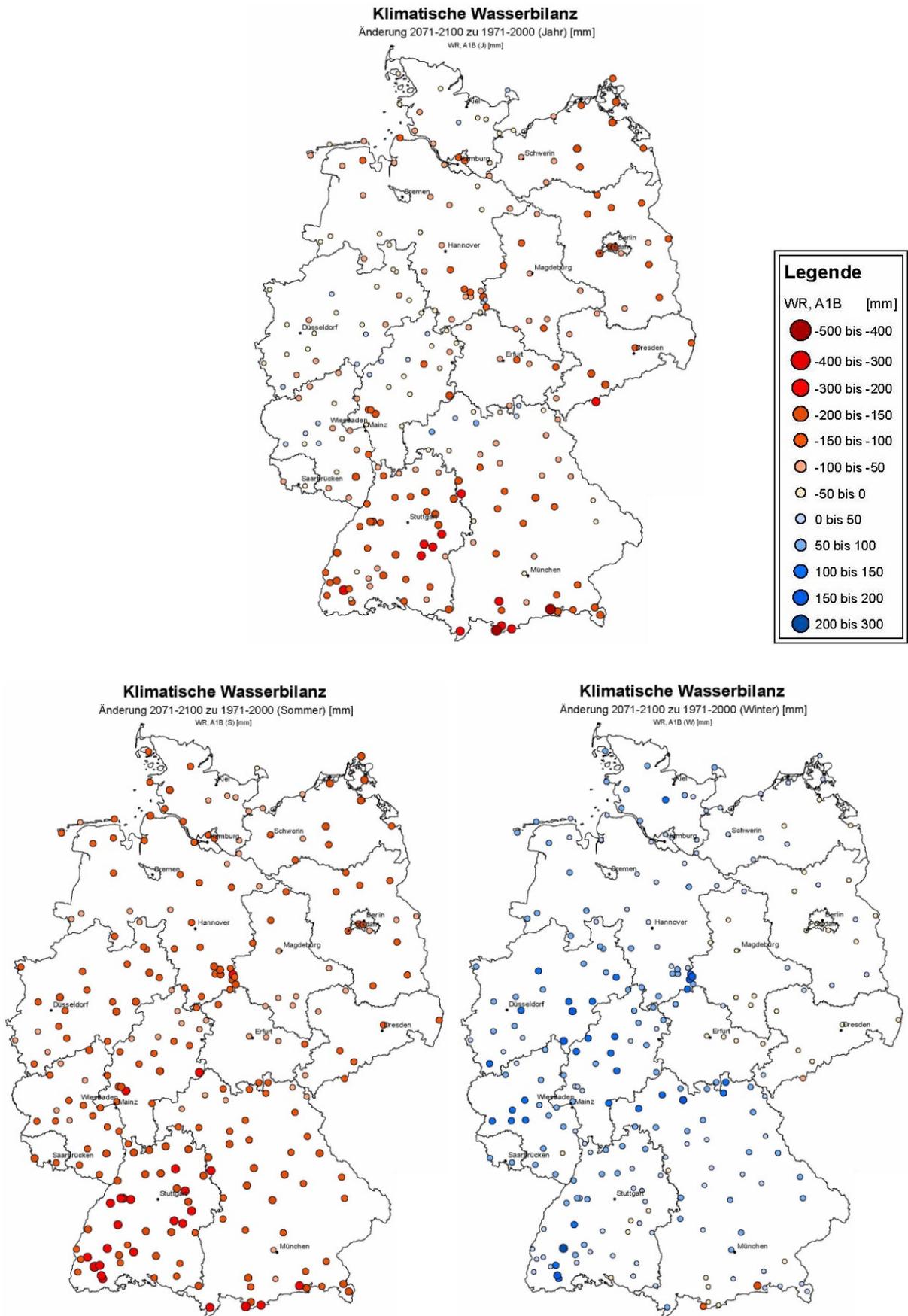


Abbildung 2.15: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2071-2100 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [mm]

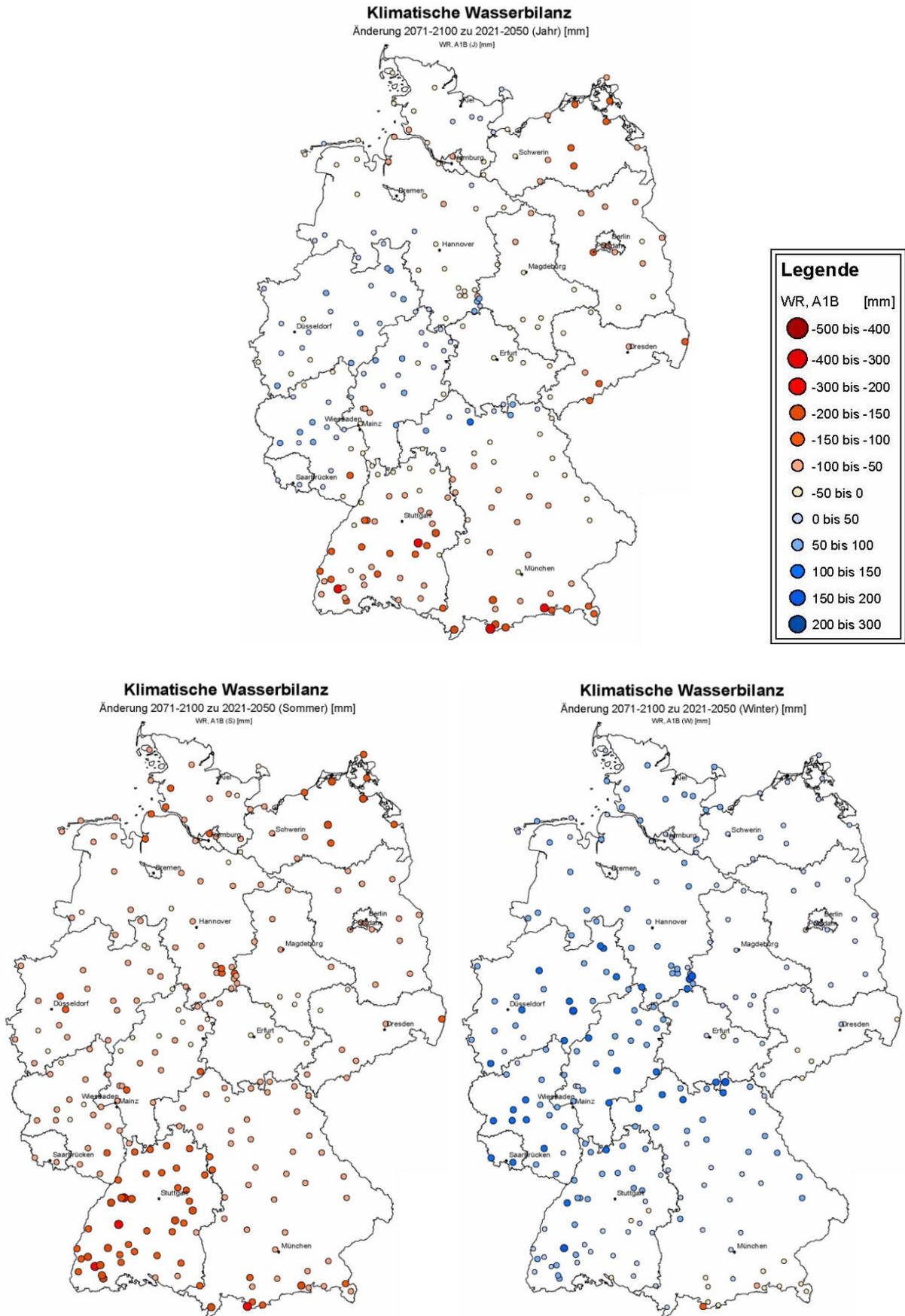


Abbildung 2.16: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2071-2100 zu 2021-2050, WETTREG, A1B [mm]

2.3 Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnungen für Deutschland

Im folgenden Unterkapitel werden die hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels getrennt nach den großen Flusseinzugsgebieten in Deutschland beschrieben. Die Auswertung stützt sich im Wesentlichen auf den vom UBA herausgegebenen Bericht zum WASKlim Projekt (SCHERZER et al. 2010). Darin wurde die Sensitivität des Wasserhaushaltes für die Flusseinzugsgebiete in Deutschland ausführlich aufgezeigt. Problematisch erwies sich bei der Untersuchung die Heterogenität der verwendeten Daten. So wurden in den verschiedenen Studien unterschiedliche Zeitreihen für die Beschreibung des bisherigen Klimas verwendet und für die Zukunftsszenarien unterschiedliche Modellketten und SRES-Szenarien. Folgende Unterkapitel geben einen Überblick über den heutigen und zukünftigen Wasserhaushalt in den großen deutschen Flussgebieten, welche in Abbildung 2.17 dargestellt sind.



Abbildung 2.17: Flussgebietseinheiten in Deutschland (UBA 2005)

2.3.1. Einzugsgebiet der Donau

Das Einzugsgebiet der Donau umfasst eine Fläche von ca. 817.000 km². Die Donau ist der zweitgrößte Fluss Europas. Auf deutschem Boden befinden sich 59.630 km² was ca. 7,3 % der Gesamtfläche entspricht. Der jährliche Mittelwasserabfluss beträgt 1.426 m³/s (Pegel Achleiten). Vom Ursprung der Donau bei Donaueschingen bzw. Furtwangen im Schwarzwald, fließt sie weiter durch die Schwäbische und Fränkische Alp, den Oberpfälzer und den Bayerischen Wald sowie den bayerischen Alpenraum und das Alpenvorland bevor sie Deutschland verlässt und über die pannonische Tiefebene und das rumänische Tiefland nach einer Fließlänge von 2.857 km in Rumänien am Donaudelta in das Schwarze Meer mündet (BMU 2003; RZD 1986; RZD 2004; SCHERZER et al. 2010).

In der Vergangenheit haben die Mittelwasserabflüsse an der Donau leicht zugenommen (KOEHLER et al. 2007). Für Hochwasserabflüsse lässt sich aus den Ergebnissen der statistischen Analysen kein einheitlicher Trend ableiten (KLIWA 2002; RZD 2004). So weisen die meisten Pegel in der jüngeren Vergangenheit eine Tendenz zu vermehrtem Auftreten von Hochwasserereignissen auf. Teilweise sind jedoch in Bayern signifikant negative Veränderungen im letzten Jahrhundert erkennbar (KLIWA 2002). An vielen bayerischen Pegeln wurde für die bisherige Entwicklung des Niedrigwasserabflusses zwar eine ansteigende Tendenz festgestellt, welche hauptsächlich durch eine Zunahme im Winter entstand (WILLEMS 2006). Allerdings sind die Trendgeraden nicht signifikant (RZD 2004).

Der Arbeitskreis KLIWA (2006) hat für verschiedene Pegel in Baden-Württemberg und in Bayern eine deutliche Tendenz zu einer zukünftigen Erhöhung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse ermittelt, welche sich insbesondere im Winterhalbjahr zeigen wird. Zukünftig ist bei den südlichen wie nördlichen Donauzuflüssen mit einer teilweise deutlichen Abnahme des Niedrigwasserabflusses zu rechnen (WILLEMS 2006). Nach HENNEGRIF et al. (2007) wird für die Dauer von Niedrigwasserperioden für die südlichen Donauzuflüsse eine starke Zunahme von mehr als 50 % erwartet. Für die Grundwasserneubildung geht man für Oberschwaben und für die schwäbische Alp zunächst von einer Zunahme aus. Jedoch ist ab der Dekade 2041-2050 mit einem Rückgang in beiden Regionen zu rechnen, welche in Oberschwaben bis zu -10 % betragen könnte (NEUMANN & GUDERA 2006).

2.3.2. Einzugsgebiet der Elbe

Das Einzugsgebiet der Elbe umfasst eine Fläche von ca. 148.270 km². Sie entspringt im tschechischen Riesengebirge und nimmt dort mit der Moldau ihren größten Zufluss auf. Durch mehrere Talsperren und Rückhaltebecken auf tschechischer Seite ist die Niedrigwasserführung stark staufengeregelt. Die deutsche Elbe, mit einer Gesamtfläche von 96.930 km², durchfließt sie die Städte Dresden, Magdeburg und Hamburg bevor sie bei Cuxhaven in die Nordsee mündet. Die Oberelbe beginnt an der Staatsgrenze, fließt durch Dresden, bis sie am Schloss Hirschstein zwischen Meißen und Riesa endet. Die Mittelelbe, welche die Elbe als Tieflandfluss bezeichnet, fließt durch Magdeburg, erfährt durch die Havel den längsten rechten Nebenfluss, und endet oberhalb von Hamburg am Stauwehr Geesthacht. Die Unterelbe bezeichnet im weiteren Sinne den gezeitenabhängigen Abschnitt des Flusses, im engeren Sinne somit den Mündungstrichter unterhalb von Hamburg. Die gesamte Fließlänge

der Elbe misst ca. 1.091 km. Der mittlere jährliche Abfluss beträgt 877 m³/s am Pegel Cuxhaven (BMU 2003).

Im Zeitraum von 1980 bis 1999 konnte für das Land Brandenburg, welches den größten Teil des östlichen Einzugsgebietes der Mittleren Elbe darstellt, ein Rückgang des mittleren Jahresabflusses von 2,5 % ermittelt werden (LUA 2006). Nordöstlich der Elbe konnte KOEHLER et al. (2007) einen jährlichen Rückgang von 0,5 % ermitteln, allerdings über einen Zeitraum von 1961-2000. Die Winterhochwässer bei Dresden zeigen nach MUDELSEE et al. (2003) eine signifikante Abnahme im Auftreten an. Für Sommerhochwasser konnte keine Veränderung festgestellt werden. Die BFG (2002b) hat für die Elbe eine deutliche Abnahme der Maxima im Winter und eine deutliche Zunahme der Maxima im Sommer ermittelt. Die Häufigkeit von extremen Niedrigwasserperioden hat sich in den letzten Jahren für die Elbe erhöht. Durch eine gezielte Niedrigwasserregulierung auf tschechischer Seite konnten die extremen Niedrigwassersituationen jedoch entschärft werden (WECHSUNG et al. 2006). Für die Grundwasserneubildungsrate wird für das Land Brandenburg für den Zeitraum 1970 bis 1999 ein deutlich negativer Trend angegeben (LUA 2006).

Zukünftig wird mittelfristig mit einer Zunahme der Niedrigwasserhäufigkeit sowie einer Abnahme im Abfluss zu rechnen sein (WECHSUNG et al. 2006). Für die Länder Sachsen (SMUL 2005), Sachsen-Anhalt und Thüringen (FRANKE et al. 2006) wird eine Verschärfung der Niedrigwassersituationen für das Sommerhalbjahr erwartet. Der Mittelwasserabfluss wird zukünftig in verschiedenen Teileinzugsgebieten der Elbe abnehmen, teilweise in erheblichem Ausmaß. Dies wird besonders deutlich an der Havel, der Unstrut, Parthe, Wipper und Querne der Fall sein (BfG 2003; SOMMER et al. 2003; WURBS 2005; PÖHLER et al. 2008). Die Hochwassersituation wird sich zukünftig deutlich verbessern. So werden beispielsweise an der Wipper und an der Querne eine Abnahme von 40 % erwartet (WURBS 2005). Für die Grundwasserneubildungsrate wird in weiten Bereichen mit einer erheblichen Abnahme gerechnet (GERS- TENGARBE et al. 2003; HATTERMANN 2004; SOMMER et al. 2003; WURBS 2005; PÖHLER et al. 2008). So wird beispielsweise im Bereich von Potsdam je nach Entfernung zum Vorfluter (Havel) mit einer Absenkung des Grundwasserspiegels im Bereich von 0,2 bis 2,5 m gerechnet (SCHÄFER & NILLERT 2007).

2.3.3. Einzugsgebiet der Ems

Die Einzugsgebietsgröße der Ems weist eine Fläche von rund 15.600 km² auf. Davon befinden sich rund 13.300 km² auf deutschem Grund. Die Fließlänge beträgt ca. 370 km. Sie entspringt in Westfalen und mündet in Niedersachsen bei Emden in die Nordsee. Die größten Zuflüsse sind die Hase in Meppen und der Tidefluss Leda mit Mündung bei Leer (KRAHE & BUSSKAMP 2003). Der mittlere jährliche Abfluss beträgt 82 m³/s am Pegel Versen (BMU 2003).

Zu dem zukünftigen Abflussregime der Ems liegen bisher nur wenige bis keine Studien vor. Lediglich für die Kenngrößen NM7Q und NM21Q konnte BELZ et al. (2004) für die Zeitreihe 1944-2003 am Pegel Versen einen signifikant positiven Trend ermitteln.

2.3.4. Einzugsgebiet der Oder

Das Einzugsgebiet der Oder umfasst eine Fläche von ca. 118.860 km² mit einer Lauflänge von 850 km. Der deutsche Anteil der Einzugsgebietsfläche beträgt allerdings lediglich 5.590 km². Die Oder entspringt in Tschechien, fließt durch Polen und bildet schließlich die Grenze zwischen Polen und Deutschland. Sie mündet an den Inseln Usedom und Wolin in die Ostsee. Die längsten Nebenflüsse sind die Lausitzer Neiße und die Warthe. Die gesamte Fließlänge der Oder beträgt 850 km, der mittlere jährliche Abfluss 558 m³/s am Pegel Hohensaaten Finow (BMU 2003). Durch den geringen Anteil an der Gesamteinzugsgebietsfläche haben die deutschen Teileinzugsgebiete kaum Einfluss auf das Abflussverhalten der Oder, insbesondere beim Hochwassergeschehen (KRAHE & BUSSKAMP 2003).

Das nahezu gesamte deutsche Odereinzugsgebiet liegt im Land Brandenburg. Hierfür weisen die mittleren Jahresabflüsse einen Rückgang um 2,5 % jährlich auf (Kapitel 2.3.2). Aufgrund der Größe des Einzugsgebietes und der damit verbundenen stabilen Speisung und des großen Anteils von Mittelgebirgsregionen am Einzugsgebiet, in denen die klimatischen Bedingungen robuster sind, ist das Abflussverhalten der Oder relativ stabil (LUA 2006). Detaillierte Untersuchungen zum deutschen Oder Einzugsgebiet liegen nicht vor, jedoch kann man von einer ähnlichen Entwicklung wie an der Elbe ausgehen (Kapitel 2.3.2).

2.3.5. Einzugsgebiet des Rheins

Das Einzugsgebiet des Rheins umfasst eine Fläche von insgesamt 185.300 km², wovon sich 104.660 km² auf deutschem Boden befinden. Die gesamte Fließlänge beträgt 1.320 km und teilt sich auf in den Alpen-, den Hoch-, den Ober-, den Mittel- und den Niederrhein. In Reichenau bei Tamins oberhalb von Chur verbinden sich die Quellflüsse des Vorderrheins und des Hinterrheins zum Alpenrhein bis er in den Bodensee mündet. Unterhalb des Bodensees, von Stein am Rhein bis nach Basel befindet sich der Hochrheinabschnitt. Der Oberrhein fließt von Basel über Mainz bis Bingen durch den durchschnittlich 35 km breiten Oberrheingraben. Bei Mainz mündet der flächenmäßig größte Nebenfluss Main in den Rhein. Der Flussabschnitt von Bingen bis südlich von Köln wird als Mittelrhein bezeichnet. Die Mosel stellt in diesem Abschnitt den größten Zufluss dar. Südlich von Köln beginnt der Niederrhein. Der Rhein mündet bei Rotterdam am Rhein-Maas-Delta in die Nordsee. Der mittlere jährliche Abfluss beträgt am Pegel Rees 2.382 m³/s (BMU 2003).

Alpenrhein und Hochrhein

Im vergangenen Jahrhundert zeigte der Alpenrhein zunächst eine Abnahme mit einer anschließend ausgleichenden Zunahme des Gesamtabflusses (SPREAFICO & WEINGARTNER 2005). Eine statistische Analyse ergab, dass ein leicht positiver Trend von 0,18 m³/s pro Jahr bestehe, dieser aber nicht signifikant sei. Am Bodensee ist für den mittleren Wasserstand zwar keine Veränderung zu erkennen, jedoch zeigen sich seit dem Jahr 1990 zwischen Juli und Mitte September abnehmende und zwischen November bis Mitte Januar zunehmende Pegelstände (KLIWA 2007). Im baden-württembergischen Einzugsgebiet des Rheins konnte mehrheitlich kein Trend zur Zunahme des Mittelwasserabflusses festgestellt werden (KLIWA 2003). Ähnlich konnten für die Hochwasserabflüsse eine nur geringe Trendsteigerung erkannt

werden (KLIWA 2002).

Zukünftig ist für den Bereich des Bodensees und des östlichen Hochrheins mit einer deutlichen Abnahme aller Niedrigwasserkennwerte von bis zu 20 % zu rechnen (WILLEMS 2006). Die Dauern der Niedrigwasserperioden werden künftig eine deutliche Zunahme erfahren (HENNEGRIFF et al. 2007). Die Grundwasserneubildungsrate im Bereich Oberschwaben steigt erst an (2021-2040), bis sie mit -10 % in der Dekade 2041-2050 eine deutliche Abnahme erfährt (NEUMANN & GUDERA 2006).

Oberrhein

Sowohl für den Mittelwasserabfluss als auch für den Hochwasserabfluss konnte kein einheitlicher Trend zur Zunahme ermittelt werden (KLIWA 2003). Allerdings hat sich seit den 70er Jahren eine Erhöhung der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse gezeigt (WEBER 2006). In vielen Mittelgebirgsregionen wird durch die Veränderung der Großwetterlagen eine Häufung von Extremhochwassern beobachtet (CASPARY & BÁRDOSSY 1995).

Am Neckar sind „offensichtliche Zunahmen“ im Mittelwasserabfluss zu erwarten (WOLFF 2003). Mit deutlichen Zunahmen des mittleren Abflusses ist ebenfalls am Main zu rechnen (KLIWA 2006). Zukünftige Hochwasserverhältnisse werden sich erheblich regional und saisonal unterscheiden (WEBER 2006). Mit einer Zunahme bei kleinen und mittleren Hochwasserereignissen ist für ganz Baden-Württemberg zu rechnen. Am Neckar zeigen die Berechnungen beispielsweise leichte Abnahmen im Sommer, allerdings steigen die Hochwasserabflüsse im Winter deutlich an (HENNEGRIFF 2006; IHRINGER 2004). Ebenso konnten am Oberen Main deutliche Erhöhungen der Winterhochwässer bei kaum veränderten Sommerhochwässern festgestellt werden (BARTH et al. 2004; KLIWA 2006). Die Aussagen zur Entwicklung des Niedrigwassers im Oberrhein reichen von einer deutlichen Abnahme für die Nidda (Nebenfluss des Mains) (BRAHMER 2006; WILLEMS 2006), über gleichbleibende Verhältnisse im Neckar Einzugsgebiet (GERLINGER 2004) bis zu regionaler Zunahme in Bereichen des Neckars, der Fränkischen Saale und des Mains (KLIWA 2006). Die Dauer der Niedrigwasserperioden wird voraussichtlich erheblich zunehmen (HENNEGRIFF et al. 2007). Die Grundwasserneubildungsrate wird sich in ganz Baden-Württemberg bis zur Mitte des Jahrhunderts erhöhen (NEUMANN & GUDERA 2006).

Mittelrhein und Niederrhein

In Nordrhein-Westfalen zeigt sich eine leichte Erhöhung der Mittelwasserabflüsse. Beispielsweise zeigte sich am Pegel Köln eine Umverteilung der Abflüsse mit weniger Abfluss im Frühjahr und mehr Abfluss im Winter. In Rheinland-Pfalz haben sich die mittleren Hochwasserereignisse seit Ende der siebziger Jahre um ca. 20 % im Vergleich zum vorherigen Zeitraum erhöht. Für Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen wird angegeben, dass bei Hochwasser kleiner bis mittlerer Jährlichkeiten eine Häufung festgestellt wurde. Allerdings beschränken sich diese Aussagen auf das Winterhalbjahr. In Nordrhein-Westfalen konnte in Bezug auf Niedrigwasserereignisse keine signifikante Veränderung festgestellt werden (MUNLV 2007; MUFV 2007).

Die Niedrigwasserkenngröße MNQ zeigt an verschiedenen Pegeln in Hessen eine generelle Abnahme um 15 bis 20 % (BRAHMER et al. 2005).

Zukünftig ist mit einem erhöhten Mittelwasserabfluss zu rechnen. Verschiedene Pegel zeigen eine Abnahme im Sommer und eine stärkere Zunahme im Winter. Im Jahresmittel bedeutet dies eine leichte Zunahme (BRAHMER 2006). Deutliche Erhöhungen zeigen sich nach SCHWANDT (2003) an den Pegeln Mosel und Sieg. Ebenso erwarten MENZEL et al. (2001) deutliche Zunahmen im Winter beispielsweise für das Einzugsgebiet der Nahe. Untersuchungen zu Hochwasserereignissen kleinerer Jährlichkeiten weisen im Nahe Einzugsgebiet eine signifikante Zunahme auf (BRAHMER 2006). Hingegen wird im Einzugsgebiet der Lahn in Bezug auf MHQ lediglich mit einer moderaten Zunahme von 2 – 8 % im Jahresmittel gerechnet. In den Monaten Dezember bis Februar beträgt die Zunahme für MHQ allerdings 8 - 20 % (BRAHMER et al. 2005). Am Mittelrhein wird ähnlich wie am Oberrhein eine steigende Grundwasserneubildungsrate prognostiziert. Beispielsweise wird in Nordrhein-Westfalen eine Erhöhung der winterlichen Neubildungsrate im Mittel von bis zu 10 % erwartet (MUNLV 2007). Ebenfalls nimmt die mittlere Grundwasserneubildungsrate in Hessen um ca. 25 % zu (BERTHOLD & HERGESELL 2005). Als unwahrscheinlich wird für Hessen das Auftreten von langen Perioden mit Trockenjahren und daraus resultierenden niedrigen Grundwasserständen angenommen (BRAHMER 2006). Für Rheinland-Pfalz wird aufgrund der ähnlichen klimatischen Verhältnisse eine vergleichbare Entwicklung erwartet (MUFV 2007).

2.3.6. Einzugsgebiet der Weser

Das Einzugsgebiet der Weser hat eine Fläche von 46.300 km², die sich komplett auf deutschem Boden befinden. Die Weser entsteht durch die Vereinigung von Werra und Fulda bei Hannoversch Münden. Sie durchfließt die Bundesländer Hessen, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Bremen bevor sie bei Bremerhaven in die Nordsee mündet. Der größte Nebenfluss ist die Aller, die unterhalb von Verden in die Weser mündet. Das Abflussregime der Weser ist sowohl durch Elemente eines Flachlandflusses als auch eines Mittelgebirgsflusses geprägt. So herrschen in den Sommermonaten oft Niedrigwasser und im Winter bilden sich sehr schnell Hochwasserspitzen (KRAHE & BUSSKAMP 2003; STAFUA OWL 2005). Der jährliche Mittelwasserabfluss beträgt 332 m³/s am Pegel Intschede. Die gesamte Fließlänge beläuft sich auf 432 km (mit Werra: 725 km) (BMU 2003).

In den letzten 60 Jahren ist ein Trend zu erhöhter Hochwassergefahr im Winter zu erkennen, während das Risiko im Sommer seit ca. 250 Jahren rückläufig ist (MUDELSEE et al. 2006). Die Jahresabflusssummen zeigen einen zunehmenden Trend (LANGE & EGGELSMANN 2007).

Für die Beschreibung des zukünftigen Abflusses können Untersuchungen von BRAHMER (2006) herangezogen werden. Darin werden drei Einzugsgebiete im Oberlauf der Weser untersucht. Daraus ergibt sich für den Mittelwasserabfluss im Jahresmittel für die Eder und die Diemel eine Abnahme im zweistelligen Bereich, während für die Fulda ein leichter Zuwachs zu erwarten ist. Für die Fulda wird zudem ein deutlicher Zuwachs im Hochwasserbereich gesehen, wohingegen sich bei der Eder und der Diemel eine geringfügige Abnahme einstellen wird. Für die Niedrigwasserabflüsse wird eine Abnahme im zweistelligen Bereich erwartet. Das Auftreten von langen Perioden mit Trockenjahren und daraus resultierenden niedrigen Grundwasserständen ist jedoch zukünftig unwahrscheinlicher.

2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Wassernutzungen

In den folgenden Unterkapiteln werden mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserversorgung, die Wasserkraft, die Binnenschifffahrt und den Gewässerzustand beschrieben. In jedem Kapitel wird das Wasserdargebot dem erforderlichen Wasserbedarf gegenübergestellt. Dies geschieht für den heutigen und den zukünftigen Zustand. Abgeschlossen wird jede Wassernutzung mit einer Auflistung möglicher Anpassungsmaßnahmen.

2.4.1. Wasserversorgung

Im langjährigen Mittel stehen Deutschland pro Jahr rund 188 Milliarden Kubikmeter Wasser zur Verfügung. Dem gegenüber steht eine Wasserentnahme aller Wassernutzungen im Jahr 2004 von ca. 35,6 Mrd. Kubikmeter (ohne Mehrfachnutzung). Demzufolge wurden in diesem Jahr insgesamt nur 19 % des jährlichen Wasserdargebotes dem Wasserkreislauf entnommen und nach Gebrauch wieder zugeführt, mit Ausnahme des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs, welcher zum großen Teil verdunstet (BDEW 2007). Die Wärmekraftwerke stellen dabei mit ca. 22,5 Mrd. m³ pro Jahr den mit Abstand größten Wassernutzer dar. Verwendet wird hierzu fast ausschließlich Oberflächenwasser, das überwiegend für Kühlzwecke benötigt wird. Der Bergbau, das verarbeitende Gewerbe und die Landwirtschaft nutzten im Jahr 2004 rund 7,7 Mrd. m³. Die öffentliche Wasserversorgung benötigt ca. 5,4 Mrd. m³. Da deutschlandweit etwa 81 % des gesamten Wasserdargebotes nicht genutzt werden, erscheint die Wasserressourcensituation in Deutschland heute insgesamt sehr günstig. Jedoch sind Wasserdargebot und Wasserbedarf nicht gleichmäßig in Deutschland verteilt, so dass es bereits heute Regionen gibt, in denen, während lang andauernder Trockenperioden, Wassermangel herrscht (ZEBISCH et al. 2005). Ausreichende Wasserquantität bedingt zudem nicht zwangsläufig eine ausreichende Wasserqualität. Es ist daher Aufgabe der Wasserversorgung, den quantitativen und qualitativen Wasserbedarf der Haushalte, der öffentlichen Einrichtungen, der Betriebe und der Landwirtschaft sicherzustellen.

Derzeit liegen noch keine flächendeckenden, deutschlandweiten Prognosen über den zukünftig zu erwartenden Wasserbedarf der Wasserversorgungseinrichtungen vor. Die Ermittlung des zukünftigen Wasserbedarfs ist sehr aufwendig und hängt von vielen Faktoren ab. So sind der sozioökonomische Wandel und die damit verbundene Entwicklung der Bevölkerung, Industrie und Energiegewinnung entscheidend. Jedoch sind auch klimatische Faktoren, wie die prognostizierte Temperaturerhöhung, von großer Bedeutung für den Wasserbedarf beispielsweise, von Wärmekraftanlagen. Um dennoch abschätzen zu können, wie sich der Wasserbedarf entwickeln könnte, müssen vorhandene Prognosen verwendet werden, die zumindest einen Teilbereich der Einflussgrößen abdecken. Das Statistische Bundesamt hat im Jahr 2006 mögliche Zukunftsvarianten der Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2050 veröffentlicht, die neben dem Wasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung auch Rückschlüsse auf eine mögliche gewerbliche und industrielle Entwicklung zulassen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006). Die darin enthaltenen 12 Szenarien unterscheiden sich in den unterschiedlichen Annahmen zur Geburtenhäufigkeit, zur Lebenserwartung und zum Saldo der Zuzüge nach und der Fortzüge aus Deutschland (Anhang A.4.1.). Alle dargestellten Varianten sagen eine deutliche Bevölkerungsabnahme bis zum Jahr 2050 voraus, was einen Rückgang

des Wasserbedarfs bedeuten würde (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006; BBR 2009). Anpassungsmaßnahmen können sowohl auf der Wasserdargebots- als auch auf der Wasserbedarfsseite getroffen werden. Auf der Wasserdargebotsseite existieren beispielsweise Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich der Infrastruktur. So fordern verschiedene Autoren eine generelle Überprüfung des Wasserversorgungsnetzes. Eine intensive Überwachung der vorhandenen Leitungsnetze und der Grundwasservorkommen, verbunden mit einer kontinuierlichen Wartung, um ungewollte Wasserverluste zu unterbinden, wird dabei vorausgesetzt (STMUGV 2007; TMLNU 2004; HAAKH 2008; GÖTTLE 2008; KÜCHLER 2005). Auf der Wasserbedarfsseite ist zum Beispiel der tägliche pro Kopf Verbrauch an Trinkwasser seit vielen Jahren rückläufig. Im Jahr 2004 wurden lediglich 126 Liter pro Einwohner und Tag verbraucht (STATISTISCHES BUNDESAMT 2007). Der Rückgang ist ein Zeichen dafür, dass bereits verschiedene Sparmaßnahmen nicht nur im verarbeitenden Gewerbe sondern auch im privaten Haushalt und im Kleingewerbe umgesetzt werden und Wirkung zeigen. In der Landwirtschaft besteht Einsparpotenzial auf der Wasserbedarfsseite durch verbesserte Bewässerungsmethoden bzw. angepasste Landnutzung (PINNEKAMP et al. 2008; KÜCHLER 2005). Durch den Bau von Kühltürmen oder Zellenkühlanlagen kann bei thermischen Kraftwerken ein alternatives Kühlsystem installiert werden, das deutlich weniger Kühlwasser benötigt als eine herkömmliche Durchlaufkühlung (BEIERKUHNLEIN et al. 2008). Weitere Maßnahmen könnten unter Umständen ein ausreichend diversifizierter Energiemix und eine stärkere Dezentralisierung der Energiegewinnung darstellen (BFG 2006). Dies kann mit Hilfe von Fernwärmenetzen umgesetzt werden. Moderne Blockheizkraftwerke, welche mit Hilfe des Kraft-Wärme-Kopplungsprinzips neben elektrischem Strom auch Wärmeenergie für Endverbraucher vor Ort erzeugen, stellen ebenso eine effiziente Maßnahme dar. Der Ausbau der Biomasse- und Windkraftnutzung sowie der Photovoltaikanlagen kann als ein weiterer Beitrag gesehen werden, den Kühlwasserbedarf im Rahmen der Energiegewinnung zu reduzieren.

2.4.2. Wasserkraft

In Deutschland wird Wasserkraft fast ausschließlich für die Erzeugung von elektrischer Energie verwendet. Wasserkraftanlagen zählen zu den erneuerbaren Energien und sind nach den Biomasse- und Windkraftanlagen die wichtigsten Energielieferanten aus diesem Bereich. Im Jahr 2008 wurde deutschlandweit ca. 0,8 % des gesamten Energieverbrauchs mit Hilfe von Wasserkraft gewonnen, was rund 20,8 Terrawattstunden (1 TWh = 1 Mrd. kWh) entspricht (BMU 2009a). Das Wasserkraftpotenzial ist allerdings regional sehr unterschiedlich. So liegt ein großer Anteil an Wasserkraftnutzung (> 10 MW) an den Flüssen des Alpenvorlandes (Bayern), sowie am Rhein in Baden-Württemberg. Die südlichen Bundesländer sind aufgrund des günstigen Gefälles und der hohen Niederschlagsmenge die Länder mit dem größten Potenzial und dem zu Folge auch die Länder mit der größten derzeitigen Wasserkraftnutzung (BUNGE et al. 2001).

Nach HORLACHER (2008) wird aufgrund der Niederschlagsverschiebung von den Sommer- in die Wintermonate die Energieproduktion aus Wasserkraft in den Wintermonaten im nördlichen Alpenraum zunehmen. Im Jahresdurchschnitt wird mit einer Zunahme um ca. 5 % für Speicher- und große Laufwasserkraftwerke bis zur Mitte des Jahrhunderts zu rechnen sein. Ab 2050 wird die Verdunstung aufgrund der weiteren Erwärmung so stark zunehmen, dass von

einer Abnahme des Wasserkraftpotenzials ausgegangen werden muss. Es ist jedoch nicht bekannt, ob Kleinwasserkraftanlagen den erhöhten Abfluss in den Wintermonaten auch nutzen können, da diese Anlagen oft enge Grenzen im Schluckvermögen aufweisen. Auch ist noch nicht bekannt, ob gegebenenfalls aus ökologischer Sicht erhöhte Sommertemperaturen auch größere Restwasserabgaben fordern. Sollte dies der Fall sein, ist auch hier mit Leistungseinbußen zu rechnen.

Das Wasserdargebot für Laufwasserkraftanlagen kann prinzipiell mit Hilfe von Speicherseen im Oberlauf, die einen kontinuierlichen Abfluss bereitstellen, oder durch Vergrößerungen des Einzugsgebietes mit Zuleitungen beeinflusst werden. An vielen Stellen ist dies jedoch praktisch nicht möglich. Auf der Wasserbedarfsseite können zukünftige Verluste aufgrund des geänderten Wasserdargebotes in Volumen und zeitlicher Verteilung beispielsweise durch modernere Anlagen mit günstigerem Wirkungsgrad kompensiert werden. Hier stehen die Herstellungskosten den Ertragskosten gegenüber. Die Rentabilität ist meist von der aktuell geltenden Einspeisevergütung abhängig. An vorhandenen Querbauwerken ohne bestehende Kraftwerke können zudem theoretisch weitere Anlagen gebaut werden.

2.4.3. Binnenschifffahrt

In Deutschland gibt es ca. 7.500 km Bundeswasserstraßen. Davon sind ca. 75 % Flüsse und ca. 25 % Kanäle (BDB 2008). Insbesondere der Küstenbereich, der Rhein von Straßburg bis zur Mündung in die Nordsee, der Mittellandkanal, der Neckar, die Mosel und die Donau weisen eine hohe Güterverkehrsdichte auf und untermauern damit die große Bedeutung der Schifffahrtsstraßen in Deutschland (STATISTISCHES BUNDESAMT 2007). Für die Bundeswasserstraßen in Deutschland sind hinsichtlich des Klimawandels vor allem zwei Faktoren entscheidend für die zukünftige Nutzung. Dies betrifft zum einen den Mindestwasserstand, der auf den Schifffahrtsstraßen für einen reibungslosen Verkehr erforderlich ist, und zum anderen die Anzahl an Hochwasserereignissen, während derer der Güterverkehr eingestellt werden muss. In staugeregelten Flüssen und Kanälen kann der Wasserstand weitgehend unabhängig vom Abfluss konstant gehalten werden. In Trockenzeiten sind vor allem die frei fließenden Flussstrecken von besonderer Bedeutung, da durch fehlende Schleusen und Stauanlagen eine Wasserstandsregulierung nicht möglich ist. Bereits heute treten kritische Wasserstände an allen Flüssen mit natürlichem Abflussregime auf (d.h. ohne Regulierung). Speziell an der Donau, zwischen Straubing und Vilshofen, an der Elbe und an der Oder kann es in niederschlagsarmen Jahren zum Erliegen des Schiffverkehrs kommen.

Szenarien des Bundesverkehrswegeplans (MANN et al. 2001) zeigen, dass infolge der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung Deutschlands und Europas, der Osterweiterung der EU sowie der Globalisierung der Märkte, die Güterverkehrsleistung auf Binnenschiffen bis zum Jahr 2015 bezogen auf 1997 um ca. 40 % auf rund 87 Mrd. tkm ansteigen wird. Im Jahr 2008 betrug die Güterverkehrsleistung auf Binnenschiffen rund 64,0 Mrd. tkm (BINNENSCHIFF 2009). Die Binnenschifffahrt wird somit auch in Zukunft eine wichtige Bedeutung des europäischen Verkehrssystems haben. Damit ist das reibungslose Funktionieren der Wasserstraßen zukünftig von noch größerer Bedeutung (MOSER et al. 2008). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) untersucht derzeit im Rahmen des Forschungsvorhabens „KLIWAS“ die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und die Handlungsoptionen für

Wirtschaft und Binnenschifffahrt. Die Untersuchungen laufen bis ins Jahr 2011 und werden durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gefördert (BFG 2009b). Treten Hochwasserereignisse auf, die den höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) übersteigen, wird ein Transportstop verhängt. Daher gibt es diesbezüglich auf der Wasserbedarfsseite hinsichtlich Schiffstypen, Hafenanlagen oder am Binnenschiff selbst kaum Anpassungsmöglichkeiten. Lediglich die Lagerhaltung kann so angepasst werden, dass durch zeitlich ausreichende Vorwarnungen Hochwasserabflüsse umgangen werden können. Im Bereich des Wasserdargebotes kann Hochwasserrückhalt zum Beispiel durch Polderanlagen umgesetzt werden. Dadurch können Hochwasserspitzen gekappt und die Schiffbarkeit der Flussabschnitte verlängert werden. Eine Anpassung auf der Wasserbedarfsseite kann z.B. eine an die Abflussverhältnisse angepasste Lagerhaltung sein. Auch ist denkbar, die Anzahl der mittelgroßen Schiffe, aufgrund des geringeren Tiefgangs, gegenüber den großen zu erhöhen. In den staugeordneten Flussabschnitten können zudem die Schleusen modernisiert werden, so dass der Wasserverlust reduziert werden kann. Ein zeitlich befristetes Ausweichen während Extremsituationen auf beispielsweise den Schienenverkehr ist ebenfalls möglich.

2.4.4. Ökologischer Gewässerzustand

Die am 22. Dezember 2000 in Kraft getretene europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) fordert die Erreichung eines guten Zustands für alle Gewässer bis zum Jahr 2015. Das gilt für alle Oberflächengewässer sowie für das Grundwasser. In den Oberflächengewässern sind sowohl der gute ökologische als auch der gute chemische Zustand und im Grundwasser der gute chemische sowie der gute mengenmäßige Zustand zu erzielen (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2000). Um die Umweltziele der europäischen Wasserrahmenrichtlinie erreichen zu können, wurde von den Bundesländern eine ökologische Bestandsaufnahme durchgeführt. Diese umfangreichen Untersuchungen wurden Ende 2004 abgeschlossen. Demnach werden voraussichtlich einige Flussgebiete (61 %) und Seen (38 %) den ökologisch guten Zustand nicht erreichen. Ebenso wird vor allem im Grundwasser (52 %) der chemisch gute Zustand vielerorts nicht erreicht werden können (BMU 2005).

Der Klimawandel beeinflusst die Gewässergüte aufgrund der prognostizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen (Größe und zeitliche Verteilung). Damit verbunden ist die Änderung der Wassertemperatur und des Abflussregimes. Anthropogen wird die Gewässergüte aufgrund von Gewässerstrukturänderungen, Wasseraus- und -einleitungen und Regulierungsmaßnahmen (z.B. Talsperren) verändert. Wie sich die Wassereinleitungen zukünftig entwickeln werden, ist heute nur schwer absehbar. Erhöht sich die Temperatur und verringert sich der Niederschlag, kann man davon ausgehen, dass an den schon heute vorhandenen Einleitungspunkten Problemstellen entstehen bzw. die Probleme zunehmen. Wassereinleiter in Deutschland müssen jedoch differenziert betrachtet werden. So belasten Abwassereinleiter die Gewässer durch erhöhte Schadstoffkonzentrationen. Bei Kühlwasserentnahmen und -einleitungen wird die Schadstoffkonzentration nicht verändert, jedoch wird bei der Entnahme die Wasserführung im Gewässer maßgeblich beeinflusst. Ebenso wird durch die Wiedereinleitung des Kühlwassers die Wassertemperatur im Fließgewässer erhöht. Die Länder Baden-Württemberg, Hessen und Schleswig-Holstein weisen die höchste Kühlwassereinleitung in Deutschland auf (STATISTISCHES BUNDESAMT 2007).

Steigen zukünftig die Flusswassertemperaturen an, ist über eine Reduzierung der Aufwärmspanne bei Kühlwassereinleitungen nachzudenken (BRAHMER et al. 2005). Durch die zu erwartende höhere Lufttemperatur wird zukünftig mit einem höheren Kühlungsbedarf zu rechnen sein. Da dennoch die Grenzwerte für die Wiedereinleitung nicht überschritten werden dürfen, sind Maßnahmen an den Wärmekraftanlagen erforderlich wie sie in Kapitel 2.4.1 genannt wurden. Die Reinigungsleistung an Kläranlagen kann durch Trennung von Schmutz- und Niederschlagswasser vergrößert werden. Um den Schmutzwasseraustritt zu reduzieren, sollte insbesondere das bestehende Leitungsnetz regelmäßig überprüft und entsprechend gewartet werden. Neben der Optimierung der Einleitungsmengen aus Wärmekraft- und Kläranlagen kann die Wassertemperatur und die Schadstoffkonzentration durch Aufhöhung des Mindestwasserabflusses verbessert werden. Dies kann durch den Bau neuer oder durch Vergrößerung vorhandener Speicher umgesetzt werden (TMLNU 2004).

2.5 Internationale und nationale Anpassungsstrategien an den Klimawandel

Die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) wurde 1992 gegründet, um „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann“ (UNFCCC 1992, Artikel 2). Die Bundesregierung hat sich zum klimapolitischen Ziel gesetzt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf weniger als 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu erreichen (KOMPASS 2009).

Neben der Beschränkung der anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen sollen die beteiligten Staaten ein Konzept für eine nationale Strategie ausarbeiten. Dies hat die Bundesregierung getan, indem sie am 17. Dezember 2008 die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“ beschlossen hat (BUNDESREGIERUNG 2008). Ein wesentliches Ziel der DAS ist es, die Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen zu stärken, damit sie für die Zukunft vorbereitet sind. Die DAS schafft einen Rahmen zur nationalen Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels. So soll schrittweise der Handlungsbedarf benannt, entsprechende Ziele definiert, Zielkonflikte erkannt und ausgeräumt sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden (KOMPASS 2009). Hierzu strebt die Bundesregierung bis Ende März 2011 die Vorlage eines gemeinsam mit den Ländern erarbeiteten „Aktionsplan Anpassung“ an, der folgende Aspekte beinhalten soll:

1. Grundsätze und Kriterien für eine Priorisierung von Handlungserfordernissen,
2. die Priorisierung der Maßnahmen des Bundes,
3. einen Überblick über konkrete Maßnahmen anderer Akteure,
4. Aussagen zu Finanzierungsmöglichkeiten,
5. Konzeptvorschläge zur Erfolgskontrolle,
6. die Weiterentwicklung der Strategie und Nennung der nächsten Schritte.

Neben der Entwicklung der eigenen Anpassungsstrategie setzt sich die Bundesregierung für die Entwicklung von Anpassungsstrategien in anderen Ländern ein. Insbesondere Entwicklungsländer, die gegenüber den nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels sehr anfällig sind, werden unterstützt.

Die Leitfragen dabei sind:

- Wie wird sich der Klimawandel auf ein Land auswirken und wie kann es schon jetzt beginnen, sich auf dieses Zukunftsszenario vorzubereiten?
- Was muss getan werden, um die wirtschaftliche, gesellschaftliche und politische Verwundbarkeit eines Landes durch den Klimawandel zu verringern?
- Wer braucht Unterstützung bei der Anpassung?

Im Zentrum stehen dabei die am stärksten betroffenen Sektoren Landwirtschaft, Wasser und Gesundheit (BMU 2009b). In der DAS werden folgende Beispiele für eine mögliche Wirkung des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft angegeben:

- Steigende Hochwasserwahrscheinlichkeit im Winter und Frühjahr.
- Häufigere Niedrigwassersituationen im Sommer mit der Gefahr von Nutzungskonflikten.
- Veränderte Grundwasserspiegel mit möglichen Folgen für das Grundwasserangebot.
- Qualitätsprobleme durch vermehrte Starkniederschläge für die Trinkwasserressourcen.

Als geeignete Maßnahmen für die Wasserwirtschaft werden folgende Punkte gesehen:

- Effizientere Nutzung der Wasserressourcen.
- Berücksichtigung veränderter Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen in der Planung wasserwirtschaftlicher Infrastruktur.
- Vernetztes Management wasserbezogener Nutzungen.
- Sektorübergreifende Abstimmung von Anpassungsmaßnahmen.
- Implementierung eines nachhaltigen Landnutzungsmanagements zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes.
- Angepasste infrastrukturelle Vorsorge zur ausreichenden Bevorratung von Wasser in Talsperren und Grundwasserleitern oder zur Bereitstellung von Trinkwasser über Verbunde.
- Verbesserung des Hochwasserschutzes.
- Schaffung von Retentionsflächen.
- Hochwasserangepasste Bauweisen und Erhöhung des Bewusstseins in der Bevölkerung über Hochwassergefahren.
- Fortführung von Wassersparmaßnahmen in Industrie, Land- und Forstwirtschaft sowie – unter Beachtung der hygienischen Anforderungen und der versorgungs- und entsorgungstechnischen Voraussetzungen – in privaten Haushalten.
- Verbesserung der Wasserqualität und des ökologischen Zustands der Oberflächengewässer zur Reduzierung der Anfälligkeit der aquatischen Ökosysteme und als Grundlage für eine sichere Trinkwasserversorgung.

Um sicherzustellen, dass in allen Sektoren und auf allen Regierungsebenen in der EU rechtzeitig kohärente und wirksame Anpassungsmaßnahmen getroffen werden, wurde von der EU in einem Weissbuch vom April 2009 ein strategischer Ansatz vorgegeben. Ziel dieses EU-Anpassungsrahmens ist es, die Widerstandskraft der EU gegenüber dem Klimawandel zu verbessern, so dass seine Folgen bewältigt werden können. Die Umsetzung erfolgt dabei in zwei Phasen. In Phase 1 (2009-2012) werden die Grundlagen für eine umfassende EU-Anpassungsstrategie gelegt und in Phase 2 (ab 2013) soll diese umgesetzt werden (KOM 2009).

Die Phase 1 behandelt dabei vier Aktionsschwerpunkte:

1. Schaffung einer soliden Wissensgrundlage über die Auswirkungen und Folgen des Klimawandels für die EU.
2. Einbeziehung des Aspekts der Anpassung in wichtige Politikbereiche der EU.
3. Kombination politischer Instrumente, um sicherzustellen, dass der Anpassungsprozess effektiv abläuft.
4. Verstärkung der internationalen Zusammenarbeit im Bereich Anpassung.

Schlüsselfragen dabei sind:

- Welches sind die tatsächlichen und die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels in dem betreffenden Sektor?
- Wie hoch sind die Kosten des Handelns/Nichthandelns?
- Wie wirken sich Maßnahmenvorschläge auf politische Maßnahmen in anderen Sektoren aus und wie ist ihre Wechselwirkung mit diesen Maßnahmen?

In Deutschland hat sich die Bayerische Staatsregierung als erste Landesregierung mit dem Klimaprogramm Bayern 2020 (STMUG 2009a) das Ziel gesetzt, die klimasensitiven und vulnerablen Bereiche bis zum Jahr 2020 bestmöglich an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels anzupassen. Hierzu wurden im Rahmen der bayerischen Klimaanpassungsstrategie für verschiedene Bereiche, die vom Klimawandel betroffen sind, mögliche Folgen und Vulnerabilitäten aufgezeigt, Handlungsziele festgelegt, bestehende Anpassungsmaßnahmen dargestellt und weitergehende staatliche sowie nicht staatliche Handlungsoptionen diskutiert (STMUG 2009b). Für die Wahl einer Anpassungsmaßnahme sollen folgende Punkte bedacht werden:

- Nachhaltigkeit
- Umweltverträglichkeit
- Wechselwirkung zwischen Klimaschutz und Anpassung (Synergien/Konflikte)
- Integrative Ansätze (Zielkonflikte vermeiden)
- Unsicherheiten (No-Regret-Policy)

Eine besondere Rolle nimmt dabei die Wasserwirtschaft ein, da sie auf andere Sektoren, wie Energieerzeugung, Landwirtschaft, Fischerei oder Tourismus großen Einfluss nimmt. Die Veränderungen des Wasserhaushaltes sind deshalb eine wichtige Grundlage für die Wahl der Anpassungsstrategie (STMUG 2009b).

Ebenso wie das Bundesland Bayern, hat das Land Nordrhein-Westfalen bereits eine Anpassungsstrategie an den Klimawandel veröffentlicht (MUNLV 2009). Diese baut auf vier Schritten auf:

1. Erstellen von kleinräumigen Klimaprojektionen.
2. Ermitteln von sektorspezifischen Anfälligkeiten in den Regionen.
3. Erarbeiten von sektorspezifischen Anpassungsmaßnahmen.
4. Umsetzung der Maßnahmen.

Hinzu kommt eine Dynamisierung der vier Schritte. Das heißt, die eingeleiteten Maßnahmen sollen kontinuierlich überprüft und ggf. Änderungen und Ergänzungen vorgenommen werden. Da die gewählten Anpassungsmaßnahmen u.a. von den zugrunde liegenden Klimaszenarien abhängen, sind auch diese hinsichtlich ihrer Annahmen kontinuierlich zu kontrollieren und bei Bedarf anzupassen. Sollten sich daraus längerfristige Abweichungen ergeben, sind die bereits eingeleiteten Maßnahmen entsprechend weiterzuentwickeln.

3. Entwicklung und beispielhafte Anwendung des WASKlim-EUS

In diesem Kapitel werden Entscheidungsunterstützungssysteme allgemein sowie das Konzept und die einzelnen Bausteine des neu entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems (EUS) vorgestellt. Das Konzept wird hierzu in vier Bereiche aufgeteilt, die Kenngrößenermittlung, die Zustandsbewertung, die Maßnahmenbewertung und in die Wahl der Anpassungsstrategie mit Maßnahmenprogramm. Anschließend werden die verwendeten Modelle, Methoden und Verfahren vorgestellt und anhand von Beispielen veranschaulicht. Aufgezeigt werden zudem mögliche Einsatzbereiche dieser Methoden im Allgemeinen und die spezielle Eignung für das neue EUS, was die Bezeichnung „WASKlim-EUS“ erhielt. Anhand eines ausführlichen Beispiels wird das WASKlim-EUS anschaulich vorgestellt. Anschließend wird erläutert, welche Weiterentwicklungspotenziale noch bestehen.

3.1 Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS)

Dieses Unterkapitel beginnt mit einer Definition von Entscheidungsunterstützungssystemen im Allgemeinen und fasst die wesentlichen Kriterien zusammen, ab wann ein EUS hilfreich erscheint. Anschließend werden vorhandene EUS in der Wasserwirtschaft vorgestellt und thematisch zugeordnet. Im Weiteren werden die Anforderungen an das neu zu entwickelnde EUS definiert und die verfügbaren Daten aufgezeigt. Zudem wird der Bedarf für die neue Entwicklung und damit die Abgrenzung von bereits existierenden Systemen begründet.

3.1.1. Definition von EUS

Nach HUMMELTENBERG und PRESSMAR (1989) werden computergestützte Entscheidungsunterstützungssysteme (engl. **Decision Support Systeme**, kurz: DSS) definiert als: „Decision Support Systeme sind Software-Umgebungen, die einen Entscheidungsträger vor allem bei schlecht strukturierten Entscheidungssituationen unterstützen sollen“. Eine etwas detailliertere Definition ist bei HAIMES (1998) zu finden: „Entscheidungsunterstützungssysteme sind interaktive, computerbasierte Systeme, welche Entscheidungsträger dabei unterstützen sollen, Daten, mathematische Methoden sowie Simulations- und Optimierungsmodelle effektiv zu nutzen, um alternative Handlungsmöglichkeiten zu generieren und sowohl strukturierte als auch unstrukturierte Probleme zu lösen“. Daraus ergeben sich drei wesentliche Voraussetzungen, bei denen die Entwicklung und die Anwendung eines Entscheidungsunterstützungssystems als sinnvoll erachtet werden kann:

1. Die Ausgangslage ist eine meist schlecht strukturierte Entscheidungssituation.
2. Anhand verschiedener Computermodelle wird die Entscheidungsfindung „unterstützt“.
3. Es werden „Handlungsmöglichkeiten“ gesucht und keine ja/nein-Entscheidung.

Hinzu kommt die Einteilung der EUS in drei Hauptgruppen, welche sich hinsichtlich des Betrachtungszeitraumes unterscheiden. So existieren Systeme, welche als operationell definiert werden und für den kurzfristigen Einsatz gedacht sind. Weiter folgen planerische Systeme, welche mittelfristige Betrachtungen anstellen und letztendlich strategische Systeme, welche langfristig orientiert sind.

3.1.2. Vorhandene EUS in der Wasserwirtschaft

Aufgrund vielfältiger Anwendungsbereiche existieren heute zahlreiche EUS. Im Bereich der Wasserwirtschaft wurden in den letzten Jahren überwiegend Systeme für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EUROPÄISCHE PARLAMENT 2000) entwickelt. Folgende Aufzählung gibt einen Überblick über vorhandene EUS in der Wasserwirtschaft.

Systeme zur EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL):

- Das fuzzybasierte EUS von BARTUSSECK (2005) und NACKEN (2006) zur ökologischen und wasserwirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen gemäß den EU-WRRL in Nordrhein-Westfalen (NRW).
- Das FluGGS vom Wupperverband in NRW, das ein onlinebasiertes EUS für die Wasserwirtschaft zur WRRL darstellt (WILLE & SPIES 2005).
- Das System Werra, welches am Beispiel des Werra-Flusseinzugsgebietes eine interaktive multikriterielle Analyse zur Abwägung von Alternativvorschlägen für Maßnahmen zur Umsetzung der WRRL zulässt (DIETRICH & SCHUMANN 2005; DIETRICH 2006).
- Das System Weiße Elster zur Strukturierung und Unterstützung des Entscheidungsprozesses zur Aufstellung von Maßnahmenprogrammen zur Umsetzung der WRRL (PETRY et al. 2005).
- Das Data Mining System zur Entscheidungsunterstützung in der Hydrologie von SEIDL et al. (2005).
- Das im Auftrag der BFG (2009a) entwickelte Elbe-DSS für Planungs- und Entscheidungsprozesse an der Elbe (KOFALK et al. 2005).
- Das System WSM300 von LEICHTFUß et al. (2003), das ebenfalls zur Umsetzung der WRRL dient.
- Das EUS mit AHP-Methodik für die Bereitstellung von Informationen bei wasserwirtschaftlichen Problemstellungen (BUCK 2005).
- Das DSS-Havel für das Einzugsgebiet der Havel, mit dessen Hilfe eine WRRL konforme Bewirtschaftungsplanung und geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität abgeleitet werden sollen (LAHMER 2003). Neben den Aspekten der WRRL werden zudem auch Hochwasserthemen und Maßnahmen für den Erhalt der Wasserstraßen betrachtet (KOFALK et al. 2009).

Systeme hinsichtlich des Wassermanagements:

- Im EU-Projekt MoNit – Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben - wurde ein Entscheidungshilfesystem zur Bewertung der Wirkung von Maßnahmen und veränderten Rahmenbedingungen auf die Nitratbelastung des Grundwassers im Oberrheingraben entwickelt (CASPER et al. 2005).
- Für die Bewirtschaftung des Grund- und Oberflächenwassers nach Menge und Beschaffenheit sowie zur Sicherung aller Nutzungsansprüche arbeitet man für das Einzugsgebiet der Spree mit dem ASU Spree (LAUTERBACH et al. 1978; GRÜNEWALD 2005).

- Im GLOWA-Volta-Projekt hat man ein EUS für nachhaltiges Wassermanagement im Westafrikanischen Voltabecken herausgearbeitet (YOUKHANA et al. 2005).
- Ein ähnliches Projekt wurde für den semiariden Nordosten Brasiliens entwickelt - das DSS-SIRI - das eine umfassende Wasserwirtschaftsplanung zulässt. Hierzu wurden alle Wassernutzer im betrachteten Einzugsgebiet hinsichtlich des aktuellen und zukünftigen Wasserbedarfs befragt, das Wasserdargebot anhand eines Niederschlags-Abfluss-Modells (AÇUMOD) ermittelt und aus den erhobenen Daten ein GIS-gesteuertes Entscheidungshilfesystem aufgestellt (BILLIB et al. 2003).

Systeme zur Talsperrensteuerung:

- Für die Echtzeitbewirtschaftung von Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr beruft man sich auf das System CARO (Computer Aided Reservoir Operation). Im dem sehr trockenen Jahr 2003 konnten damit bereits gute Ergebnisse erzielt werden. So wurde der gesetzlich vorgeschriebene Mindestabfluss in der Ruhr in diesem extremen Jahr zu keinem Zeitpunkt unterschritten (MORGENSCHWEIS & ZUR STRASSEN 2004, 2005).
- In landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebieten vor Trinkwassertalsperren werden Betreiber vor die Aufgabe gestellt, einen Ausgleich zwischen der Wasserqualität und der Einschränkung der landwirtschaftlichen Nutzung zu finden. Hierzu wurde für die thüringische Talsperrenverwaltung das auf neuronalen Netzen basierende System IWES entworfen, womit ein weitgehend optimales Szenario für die Landnutzung ermittelt werden kann (FINK et al. 2003).

System zum Hochwasserschutz:

- Ein EUS für die Entwicklung eines Hochwasserschutzkonzeptes mit der Methodik der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung wurde von BACHMANN et al. (2009) erstellt.
- Auch von LEVY (2005) gibt es ein multikriterielles Entscheidungsfindungs- und unterstützungssystem für das Hochwassermanagement.
- Das System nofdp-IDSS gilt als ein interaktives Planungsinstrument, das der Realisierung eines naturverträglichen Schutzes vor Hochwasserschäden dient (HORCHLER et al. 2008).
- In dem von der Gemeinschaftsinitiative Interreg IIIb unterstützten WaReLa Projekt (Water Retention by Land Use) wurde ein EUS herausgearbeitet, mit dessen Hilfe Hochwasserkatastrophen durch Maßnahmen in der vorbeugenden Landnutzung vermindert werden sollen (SEELING & SCHÜLER 2005).

Systeme hinsichtlich des Klimawandels:

- Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes GLOWA-Danube (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs) wurde ein umfangreiches EUS für die Donau aufgebaut, das die Faktoren Klimawandel, Landnutzung, Wasserverschmutzung oder den veränderten Pro-Kopf-Wasserverbrauch sowie die Wasserverfügbarkeit und -qualität berücksichtigt (CESR 2009).

- Das EUS Baukasten Maas wurde im Hinblick auf die zu erwartende Klimaänderung in den Niederlanden erstellt. Allerdings bezieht sich das System überwiegend auf die Folgen für Flussbaumaßnahmen (REUBER & VON HENGEL 2005).
- Mit dem DSS-WuK (Wald und Klimawandel) arbeitet man im Rahmen von „klima-zwei“. Es soll den notwendigen Anpassungsprozess der forstlichen Bewirtschaftung durch ein praxisorientiertes Entscheidungssystem unterstützen (FORSCHUNGSZENTRUM WALDÖKOSYSTEME 2008).
- Für die Landwirtschaft ist das System LandCaRe-DSS, ein interaktives, modellgestütztes Wissens- und Entscheidungsunterstützungssystem für die Klimaanpassung im Einsatz (ZALF 2008).
- Im Rahmen des KRIM-Projektes (Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste) verlässt man sich auf ein EUS für das Küstenzonenmanagement, das sich im Wesentlichen auf die Verarbeitung, Analyse und graphischer Darstellung von Informationen bezieht (KRAFT 2005).

Sonstige EUS:

- Für die Regenwasserbewirtschaftung wurde das System DAYWATER erstellt. Darin werden u.a. die Verfahren der Barwertmethode und Nutzwertanalyse verwendet (SIEKER et al. 2005).
- Ein weiteres EUS ist für den Betreiber des Emssperrwerkes im Einsatz, das die Aufstauung der Ems zur Überführung von Schiffen der Meyerwerft unterstützt (STEINRÜCKE et al. 2005).
- Für den Ausbau und die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen wurde das System INFORM (Integrated Floodplain Response Model) zur Auswahl und Optimierung verschiedener Maßnahmen aufgebaut (BFG 2002a; FUCHS 2005).
- Mit dem System FLOWS (Flood Plain Land Use Optimizing Workable Sustainability) arbeitet man im Nordseeraum, wo man sich neben Hochwasserauswirkungen auch mit integrierten Flächenmanagement in Auenlandschaften befasst. An der Entwicklung im Rahmen des EU Interreg-Projektes beteiligten sich neben Deutschland auch Großbritannien, Niederlande, Schweden und Norwegen (EVERS 2005).
- Ein auf dem Fuzzy-Logik Ansatz beruhendes EUS wurde für die Bestimmung von morphologischen Auen in Sachsen-Anhalt aufgebaut (MEHL et al. 2009).
- Ein EUS, das zwar nicht für die Wasserwirtschaft jedoch für das angrenzende Fachgebiet der Raumplanung entworfen wurde, sei auch an dieser Stelle erwähnt, da es u.a. die Methodik der Fuzzy-Logik verwendet. Dieses EUS, das aus einer Kombination aus dem Methodenpaket IeMAX und dem Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS besteht, wurde für die integrative Raumplanung im Rahmen einer Dissertation entwickelt (HERZOG 2002).

3.1.3. Anforderungen an das neue EUS

Das neue EUS soll in erster Linie die Vulnerabilität und die Anpassungskapazität verschiedener Wassernutzungen hinsichtlich des Klimawandels aufzeigen. Hierzu sind Schwellenwerte einzuführen und ihre Bedeutung herauszuarbeiten. Ebenso müssen neben der Klimaänderung sich ändernde Rahmenbedingungen, wie der demographische Wandel oder die Globalisierung, berücksichtigt werden. Diesem Anspruch wird das neue EUS gerecht, indem Kenngrößen festgelegt werden, die zum einen aus Klimaszenarien aber zum anderen auch aus Prognosen beispielsweise zur Bevölkerungsentwicklung errechnet wurden.

Der Umgang mit Entscheidungen unter Unsicherheit stellt, neben den allgemeinen Anforderungen an ein EUS, den Kern des neuen EUS dar. Für diese Problematik musste eine geeignete Methodik gefunden werden, die es zulässt mit unsicheren und unklaren Aussagen zu einer klaren Lösung zu kommen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurde die Fuzzy-Logik („unscharfe“ Logik) verwendet.

Ein weiteres wichtiges Kriterium war die Berücksichtigung von Synergieeffekten. Sowohl positive als auch negative Auswirkungen der entwickelten Anpassungsmaßnahmen auf andere Wassernutzungen sollten berücksichtigt werden. Diesem Punkt wurde Rechnung getragen, indem eine Gesamtbewertung der vorgeschlagenen Maßnahmen durchgeführt wird, die die Belange der einzelnen Wassernutzungen berücksichtigt.

Das neue System sollte zwar am Beispiel der Wasserwirtschaft entwickelt und getestet werden, jedoch galt der Anspruch, das Verfahren und die Methodik auf andere Bereiche übertragen zu können.

Inwiefern diese Anforderungen das neu entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem WASKlim-EUS erfüllt, wird in den folgenden Kapiteln ausführlich erläutert.

3.1.4. Verfügbare Daten für das neue EUS

Wesentliche Grundlagen für das neue EUS sind Ergebnisse der regionalen Klimamodelle WETTREG und REMO (Kapitel 2.1.3). Die daraus ermittelten meteorologischen Klimadaten dienen als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsberechnungen im Einzugsgebiet. Daraus wiederum konnten Abflussganglinien an ausgewählten Pegeln abgeleitet und hydrologische Kenngrößen statistisch ermittelt werden. Insgesamt lagen neun unterschiedliche Szenarienrechnungen vor (WDC 2008).

- WETTREG der Zeitreihen 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 vom Szenario A1B, A2 und B1, als jeweils eine feuchte und eine trockene Realisation (gesamt sechs Szenarien).
- REMO der Zeitreihen 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 vom Szenario A1B, A2 und B1 (gesamt drei Szenarien).

Prinzipiell können auch andere Klimaszenarien und Regionalisierungsmodelle verwendet werden. Neben den meteorologischen Daten werden auch Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung bis zum Jahr 2050 für die Bestimmung der Entwicklungskenngrößen herangezogen. Diese wurden vom Statistischen Bundesamt in Form der 11. koordinierten Bevölkerungsvor-

rausberechnung veröffentlicht (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006; BBR 2009). Weitere Details zu den Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung sind dem Anhang A.4.1. zu entnehmen. Die entscheidende Basis des neu entwickelten WASKlim-EUS stellt jedoch die Beteiligung von Experten vor Ort dar. Anhand eines Fragebogens wurden wesentliche Angaben für die Beurteilung der hydrologischen Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen in drei ausgewählten Regionen erfasst. Zudem wurden konkrete Anpassungsmaßnahmen erhoben und bewertet. Anhand dieser Informationen konnte das Regelsystem, welches den Kern des neuen WASKlim-EUS bildet, aufgebaut und entsprechend ausgewertet werden.

3.1.5. Abgrenzung des neuen EUS von vorhandenen Systemen

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, existieren bereits eine Vielzahl von Entscheidungsunterstützungssystemen. Ein wesentliches Kriterium ist hierbei der Betrachtungshorizont. Da die Klimaänderung ein sehr langwieriger Prozess ist und sich wahrscheinlich erst deutlich in der Mitte dieses Jahrhunderts zeigen wird, scheiden kurzfristig und mittelfristig orientierte EUS im vorliegenden Fall aus. Es ist also ein strategisches System zu entwickeln, das langfristig orientiert ist. Die oben beschriebenen Systeme sind überwiegend operationelle Systeme und beziehen sich meistens auf die Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie.

Für den Bereich Klimawandel existieren zwar bereits einige EUS, jedoch beziehen sie sich auf die Bereiche Flussbaumaßnahmen (EUS Baukasten Maas), die Wald- und Forstwirtschaft (DSS-WuK), die Landwirtschaft (LandCaRe-DSS) oder das Küstenschutzmanagement an der Nordsee (KRIM-Projekt). Das System GLOWA-Danube kommt den in Kapitel 3.1.3 genannten Anforderungen, die das neue System erfüllen soll, am nächsten. Jedoch ist bei diesem System eine große und detaillierte Datenmenge über bspw. die unterschiedlichen Wasserein- und -ausleitungsmengen und deren zeitlichen Verteilung im EZG erforderlich. Da für alle Wassernutzungen im EZG exakte Betriebsdaten erfasst und in das EUS eingegeben werden müssen, ist der Aufwand an Preprocessing enorm. Zudem sind konkrete Aussagen über den zukünftigen Wasserbedarf nötig, die aufwendig über verschiedene Annahmen und Modelle erhoben werden müssen. Für die Anwendung des WASKlim-EUS hingegen sind lediglich Wasserhaushaltsberechnungen unter Berücksichtigung des zukünftigen Klimas und einfache Stakeholderbefragungen notwendig, die den Prozess der Anpassung an den Klimawandel gegenüber dem GLOWA-Danube deutlich vereinfachen. Zudem ist das WASKlim-EUS auf andere EZG und Bereiche übertragbar, was beim GLOWA-Danube, wie der Name schon sagt, nur begrenzt bzw. nicht möglich ist. Nach derzeitigem Kenntnisstand existiert daher kein System, das die in Kapitel 3.1.3 genannten Anforderungen erfüllt.

3.2 Konzept des WASKlim-EUS

Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass bereits heute Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels getroffen werden müssen. So hat die Bundesregierung im Dezember 2008 eine „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“ beschlossen (BUNDESREGIERUNG 2008). In einem darin vorgesehenen Aktionsplan wird die „Identifizierung und Priorisierung von Handlungserfordernissen“ als erster und grundlegender Schritt angesehen, sich an die Folgen des Klimawandels anzupassen.

Um diesen Prozess für die betroffenen Regionen zu erleichtern und die Entscheidung auf eine nachvollziehbare und plausible Basis zu stellen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „WASKlim – Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel“ im Auftrag des Umweltbundesamtes ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt (SCHERZER et al. 2010). Ein wesentliches Merkmal dieses neuen EUS sollte die Übertragbarkeit auf andere Bereiche, wie beispielsweise die Land- und Forstwirtschaft, die Gesundheit, den Tourismus, der Verkehr oder auch die Biodiversität und der Naturschutz sein. Die Entwicklung des „WASKlim-EUS“ erfolgte jedoch aus Sicht wasserwirtschaftlicher Handlungs- und Anpassungserfordernisse. Folgende Kapitel behandeln daher Wassernutzungen, wie Wasserver- und -entsorgung, Kühlwasserentnahmen und -einleitungen, Wasserkraftnutzungen, Gewässerzustand und Fischerei. Der Kern des neuen EUS stellt die Zustandsbewertung der Wassernutzungen dar. Diese basiert auf der Annahme, dass der Zustand einer Wassernutzung aus einem Vergleich von Wasserdargebot zu Wasserbedarf ermittelt werden kann. Ist beispielsweise der Wasserbedarf geringer als das Wasserdargebot, so stellt sich ein positiver Zustand ein. Aufbauend auf den Klimamodellen kann bereits heute die Bandbreite der Klimaänderung und daraus resultierend die Bandbreite des wahrscheinlichen Wasserdargebotes simuliert werden. Allerdings ist es nicht möglich, zuverlässige Szenarien für den zukünftigen Wasserbedarf der verschiedenen Wassernutzungen darzustellen, da dieser von vielen Faktoren, wie beispielsweise den politischen Entscheidungen beeinflusst wird. Hinsichtlich des Wasserbedarfs der Wassernutzungen können daher lediglich sehr unsichere Szenarien und Einschätzungen angenommen werden (Abbildung 3.1).

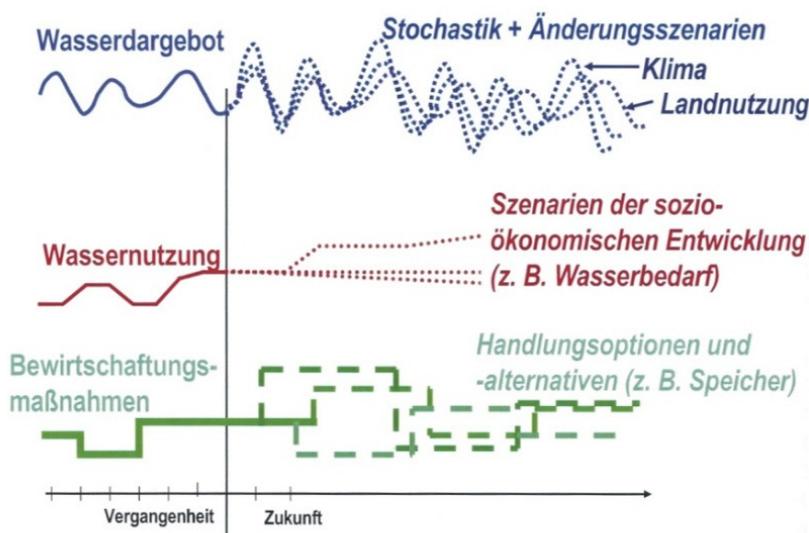


Abbildung 3.1: Rahmenbedingungen der Wasserwirtschaft (KADEN & KALTOFEN 2004)

Für die Quantifizierung des Wasserdargebotes werden im vorliegenden Konzept überwiegend hydrologische Kenngrößen verwendet. Für die Bewertung des Wasserbedarfs werden neben Entwicklungskenngrößen, wie der Bevölkerungsentwicklung auch meteorologische Kenngrößen und eine allgemeine Einschätzung zur ökonomischen Entwicklung herangezogen. Liegt die Zustandsbewertung der verschiedenen Wassernutzungen vor, können Anpassungsmaßnahmen eruiert und anhand einer Nutzwertanalyse bewertet werden. Der Aufbau des neuen Systems erfolgt dabei in folgenden Schritten und anhand des Schemas in Abbildung 3.2:

- 1) Kenngrößenermittlung
 - a. Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen
 - b. Ermittlung der Entwicklungskenngrößen
 - c. Statistische Auswertung der Kenngrößen
- 2) Zustandsbewertung (Vergleich von Wasserdargebot zu Wasserbedarf)
 - a. Bewertung des Wasserdargebotes mit Hilfe der hydrologischen Kenngrößen – heute und zukünftig
 - b. Bewertung des Wasserbedarfs mit Hilfe der Entwicklungskenngrößen – heute und zukünftig
 - c. Auswertung des heutigen und zukünftigen Zustandes ohne Maßnahmen
- 3) Maßnahmenbewertung verschiedener Wassernutzungen
 - a. Bewertung der Wirkung verschiedener, alternativer Maßnahmen
 - b. Maßnahmenbewertung unter Berücksichtigung der Zustandsbewertung
- 4) Anpassungsstrategie mit Maßnahmenprogramm

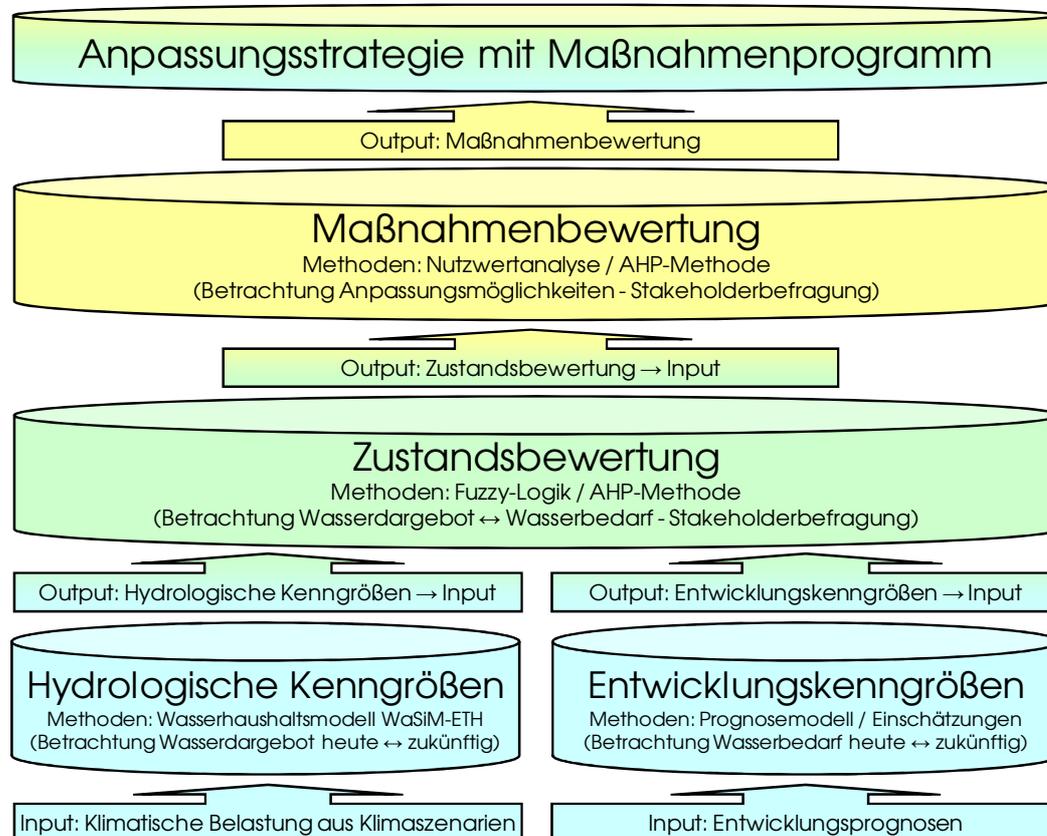


Abbildung 3.2: Aufbauschema des Entscheidungsunterstützungssystems WASKlim-EUS

Im Allgemeinen können Entscheidungen hinsichtlich des Umsetzungszeitpunktes in drei Bereiche eingeteilt werden, den operationellen (kurzfristigen), den planerischen (mittelfristigen) und den strategischen (langfristigen) Bereich. Das im Folgenden vorgestellte Entscheidungsunterstützungssystem befasst sich ausschließlich mit dem strategischen, also dem langfristigen Bereich (BUCHHOLZ & SCHITTHELM 2005).

3.2.1. Kenngrößenermittlung

Die Bestimmung des heutigen und zukünftigen Zustandes der oben genannten Wassernutzungen erfolgt auf Basis einer Kenngrößenbewertung. Die Kenngrößen spiegeln dabei den heutigen und einen möglichen, zukünftigen Zustand des Wasserdargebotes sowie die heutige und zukünftige Entwicklung des Wasserbedarfs wieder. Auf die Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen für die Bewertung des Wasserdargebotes wurde dabei besonderes Augenmerk gelegt. Ebenso können für die Entwicklung des Wasserbedarfs neben meteorologischen Entwicklungskenngrößen auch Prognosemodelle bspw. für die Bevölkerungsentwicklung herangezogen werden, die bis zum Jahr 2050 vorliegen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006).

Hydrologische Kenngrößen

Die Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen erfolgt über eine Modellkette, angefangen bei den IPCC-Klimaszenarien, über ein globales Klimamodell, zwei regionalen Klimamodellen, ein Wasserhaushaltsmodell und die statistische Berechnung der Abflussgrößen zu hydrologischen Kenngrößen (Abbildung 3.3).

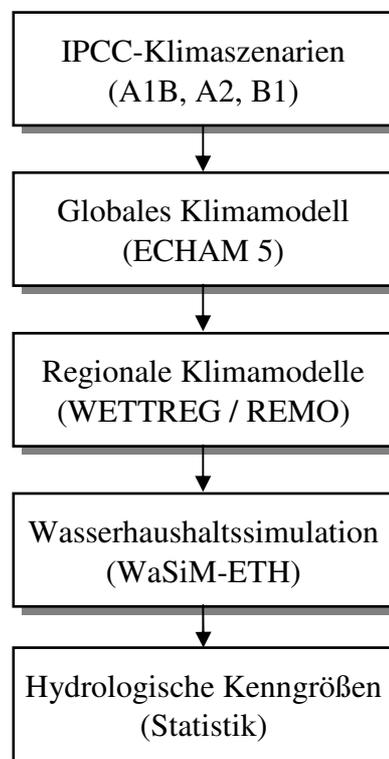


Abbildung 3.3: Modellkette Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen

In den IPCC-Szenarien wurden unterschiedliche Entwicklungen der Treibhausgase anhand konkreter Annahmen, beispielsweise zur Entwicklung der Weltbevölkerung oder der ökonomischen Entwicklung, bis zum Jahr 2100 konstruiert. Diese Annahmen stellen den Antrieb für die globalen Klimamodelle, wie beispielsweise dem ECHAM 5 Model dar. Das Globalmodell, welches daraus das Klima der gesamten Erdoberfläche in einem Raster von ca. 200 x 200 km simuliert, liefert konkrete Werte zukünftiger meteorologischer Größen wie Niederschlag, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Temperatur und Windgeschwindigkeit. Da dieses Raster im vorliegenden Fall zu grobmaschig ist, wurden regionale Klimamodelle verwendet um die meteorologischen Größen auf ein kleineres Raster zu vergrößern (Downscaling). Diese Raster entsprechen bei statistischen downscaling Verfahren dem realen Abstand der meteorologischen Messstationen in Deutschland und bei physikalisch basierten Verfahren einem regelmäßigen Raster, das je nach Modell eine räumliche Auflösung von derzeit bis zu 10 x 10 km aufweist. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells kann anschließend der komplexe Niederschlags-Abfluss-Prozess in einem abgeschlossenen Einzugsgebiet berechnet werden. Die Kalibrierung und Validierung des Modells erfolgt dabei anhand vergangener, gemessener Jahresreihen. Das validierte Wasserhaushaltsmodell wird anschließend mit zukünftigen meteorologischen Größen aus den regionalen Klimamodellen bestückt. Als Ergebnis erhält man, an im Vorfeld definierten Pegelstellen, konkrete zukünftige Abflusswerte im Einzugsgebiet in Abhängigkeit der gewählten IPCC-Szenarien und des verwendeten globalen und regionalen Modells. Derzeit liegen meteorologische Datenreihen in Deutschland, gestaffelt in Dekaden, bis zum Jahr 2100 vor. Da die jeweiligen Berechnungen jedoch sehr aufwendig und langwierig sind, wurden für das WASKlim-EUS lediglich drei Zeitreihen verwendet: Die Zeitreihe von 1971-2000 als sogenannten Kontrolllauf (IST), die Zeitreihe 2021-2050 benannt als „nahe Zukunft (Z1)“ und die Zeitreihe 2071-2100 benannt als „ferne Zukunft (Z2)“. Aus den so errechneten Abflusswerten werden verschiedene typische hydrologische Kenngrößen wie Mittelwasserabfluss (MQ) oder mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ) ermittelt. Eine weitere Unterteilung dieser Kenngrößen erfolgt nach Jahreszeiten. So wurden für alle Größen in Tabelle 3.1 zusätzlich die Werte für den hydrologischen Sommer (Mai bis Oktober) und den hydrologischen Winter (November bis April) berechnet. Prinzipiell kann unten stehende Liste noch beliebig erweitert werden.

Tabelle 3.1: Übersicht verwendeter hydrologischer Kenngrößen

Bezeichnung	Symbol / Abkürzung	Einheit
Mittlerer Hochwasserabfluss	MHQ	[m ³ /s]
Mittlerer Abfluss	MQ	[m ³ /s]
Mittlerer Niedrigwasserabfluss	MNQ	[m ³ /s]
Höchster Hochwasserabfluss	HHQ	[m ³ /s]
Niedrigster Niedrigwasserabfluss	NNQ	[m ³ /s]
Anzahl der Unterschreitungstage von MNQ	UZ < MNQ	[n]
Grundwasserneubildungsrate	GWN	[%]
Wassertemperatur	W-Temp	[°C bzw. K]

Bewertet werden jedoch nicht die absoluten Werte der hydrologischen Kenngrößen, sondern die prozentuale Änderung der Mittelwerte (MW) der zukünftigen Kenngrößen Z1 und Z2 in Relation zu den heutigen Kenngrößen (IST).

$$\text{Hydrol. Kenngröße Z1(Z2)} = \frac{\text{MW der Kenngröße Z1(Z2)}}{\text{MW der Kenngröße IST}}, \text{ in [\%]} \quad \text{Gleich. (3.1)}$$

Für die Berechnungen der hydrologischen Kenngrößen wurde das Globalmodell ECHAM 5, die Regionalisierungsmodelle WETTREG und REMO und jeweils die IPCC-Szenarien A1B, A2, B1 verwendet (Kapitel 2.1). Bei den WETTREG Szenarien wurde zudem zwischen extrem feuchten (f) und extrem trockenen (t) Modellläufen unterschieden (Kapitel 2.2.3). Insgesamt ergeben sich dadurch sechs WETTREG und drei REMO Berechnungen. Prinzipiell können aber auch synthetische (hier: fiktive) Klimaszenarien eingegeben oder auch gleich hydrologische Kenngrößen (in %) angenommen werden.

Als Datengrundlage für die Berechnung der Kenngrößen wurden vom Umweltbundesamt meteorologische Daten sowohl aus den WETTREG als auch aus den REMO Rechenläufen zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH (Kapitel 3.3) konnten anschließend Abflussberechnungen durchgeführt und die hydrologischen Kenngrößen ermittelt werden.

Entwicklungskenngrößen

Für die Bewertung des heutigen und zukünftigen Wasserbedarfs werden Entwicklungskenngrößen herangezogen. Diese können neben meteorologischen Kenngrößen wie der Temperaturentwicklung auch Kenngrößen zur Bevölkerungsentwicklung oder zum ökonomischen Strukturwandel sein. Prinzipiell kann unten stehende Liste noch beliebig erweitert werden.

Tabelle 3.2: Übersicht verwendeter Entwicklungskenngrößen

Bezeichnung	Symbol / Abkürzung	Einheit
Bevölkerungsentwicklung	Bev.Entw.	[Einwohner]
Ökonomischer Strukturwandel	Ökon.Sw.	[-]
Lufttemperatur	L-Temp	[°C bzw. K]

Die Berechnung der Änderung der Entwicklungskenngrößen erfolgt, mit Ausnahme des ökonomischen Strukturwandels, wie bei der Berechnung der hydrologischen Kenngrößen.

$$\text{Entwicklungskenngröße Z1(Z2)} = \frac{\text{MW der Kenngröße Z1(Z2)}}{\text{MW der Kenngröße IST}}, \text{ in [\%]} \quad \text{Gleich. (3.2)}$$

Die Ermittlung der Bevölkerungsänderung wurde im Rahmen der 11-ten koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung vom Statistischen Bundesamt im November 2006 durchgeführt (Anhang A.4.1.). Alle darin enthaltenen Szenarien zeigen einen deutlichen Bevölkerungsrückgang bis zum Jahr 2050, solange sich die aktuelle demografische Entwicklung nicht

grundlegend ändert (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006; BBR 2009). Für die Entwicklung des ökonomischen Strukturwandels liegen derzeit noch keine Szenarien vor. Da dies jedoch für viele Wassernutzungen ein wichtiges Beurteilungskriterium ist, wird die Entwicklung des ökonomischen Strukturwandels durch Stakeholder in den betroffenen Regionen abgeschätzt. Wie dies im Detail erfolgt, wird in Kapitel 3.7 dargestellt. Eine mögliche Entwicklung der Lufttemperatur ist den o.g. regionalen Klimamodellen zu entnehmen. Die Berechnung der Änderung erfolgt nach Glch. (3.2)⁴.

3.2.2. Zustandsbewertung

Eine bedeutsame Anforderung an das WASKlim-EUS bestand darin, neben empirisch abgesicherten Daten auch unsichere Daten wie die zu erwartende Klimaänderung oder sich ändernde gesellschaftliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Bauen jedoch auf solchen unsicheren Daten weitere Auswertungen auf, stellt sich die Frage nach der zu verwendeten Methodik. Für das Entscheidungsunterstützungssystem WASKlim-EUS wurde daher die sogenannte Fuzzy-Logik verwendet, die sich speziell für Fragestellungen hinsichtlich größerer Unsicherheiten eignet (Kapitel 3.4). Zu Beginn der Zustandsbewertung sind jedoch Expertenangaben erforderlich, mit dessen Hilfe erst das Fuzzy-Logik Regelwerk aufgestellt werden kann (ZADEH 1965).

Expertenbefragung

Ein wesentlicher Bestandteil des neuen Entscheidungsunterstützungssystems ist die Berücksichtigung von Expertenwissen. Daher wurde für die Anwendung des WASKlim-EUS ein spezieller Fragenkatalog entwickelt, der die Experteneinschätzungen zu den hydrologischen Kenngrößen und zu den Entwicklungskenngrößen erfasst (siehe Fragebogen im Anhang A.3.). Befragt wurden Vertreter der im Einzugsgebiet vorkommenden Wassernutzungen. Der Fragebogen orientiert sich dabei an dem Konzept des WASKlim-EUS. Für die Zustandsermittlung werden sowohl drei Fragen zum Wasserdargebot als auch drei Fragen zum Wasserbedarf gestellt.

Wasserdargebot

Für die Bewertung des Wasserdargebotes hinsichtlich einer ausgewählten Wassernutzung sind drei Punkte zu beantworten:

1. Welche hydrologischen Kenngrößen sind für die Bewertung des Wasserdargebotes erforderlich?
2. Wie sind die ausgewählten hydrologischen Kenngrößen zu bewerten?
3. Wie sind die ausgewählten hydrologischen Kenngrößen untereinander zu gewichten?

⁴ Für die Berechnung der Entwicklungskenngröße Lufttemperatur (J, S, W) wurden Werte in der Einheit Grad Celsius verwendet, da sich dies für die Bewertung durch Experten als praktikabler erwies, als die Einheit Kelvin.

Die Frage 1 zielt darauf ab, dass in Abhängigkeit der zu bewertenden Wassernutzung unterschiedliche hydrologische Kenngrößen beachtet werden müssen. Daher sind diese für jede Wassernutzung zu ermitteln. In Tabelle 3.3 wurden beispielsweise die hydrologischen Kenngrößen MQ und MNQ ausgewählt.

Durch die Frage 2 werden die wesentlichen Informationen für das Aufstellen des Fuzzy-Logik Systems abgefragt. Für die Bewertung der hydrologischen Kenngrößen wurden sieben Bewertungsstufen eingeführt. Diese reichen von äußerst schlecht über sehr schlecht, schlecht, zufriedenstellend, gut, sehr gut bis äußerst gut. Die Anzahl der Bewertungsstufen wurde deshalb auf sieben Stufen festgelegt, da Untersuchungen zeigen, dass die kognitiven Fähigkeiten zum Umgang mit komplexen Sachverhalten bei einer gleichzeitigen Analyse von Daten bei 7 (+/- 2) Faktoren liegen (MILLER 1956). Bei der Bewertung durch die Experten wird, wenn möglich, jeder Bewertungsstufe eine prozentuale Änderung der jeweiligen hydrologischen Kenngröße zugeordnet. Bei der Einschätzung ist daher zu überlegen, bei welcher prozentualen Änderung der hydrologischen Kenngröße die jeweilige Bewertungsstufe erreicht wird. Die prozentualen Werte sind dabei von den Experten anzugeben (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Beispiel für die Bewertung der hydrologischen Kenngröße MQ

Hydrologische Kenngröße(n)	Bewertungsstufen						
	äußerst schlecht	sehr schlecht	schlecht	zufriedenstellend	gut	sehr gut	äußerst gut
MQ [%]	< 80	-	90	95-105	110-115	120	> 125
MNQ [%]	< 70	-	-	90-110	-	-	> 130

kursiv = Angabe des Experten

Als Minimalangaben sind die Bewertungsstufen für „äußerst schlecht“ und „äußerst gut“ zu nennen. Unter Berücksichtigung des zufriedenstellenden Zustandes mit 100 % können dann die noch fehlenden Werte automatisch vom System interpoliert werden. Im vorliegenden Beispiel, in Tabelle 3.3, wird die Bewertungsstufe „äußerst schlecht“ erreicht, wenn der mittlere Abfluss MQ zukünftig auf 80 % oder weniger zurückgehen würde. Die Bewertungsstufe „äußerst gut“ wird erreicht, wenn der mittlere Abfluss MQ zukünftig über 125 % ansteigt. 100 % stellt dabei den Referenzzustand dar und entspricht dem heutigen Zustand bzw. dem Zustand zwischen 1971-2000. Graphisch kann die Bewertung der hydrologischen Kenngrößen folgendermaßen dargestellt werden (Abbildung 3.4):

Bewertung der hydrologischen Kenngrößen

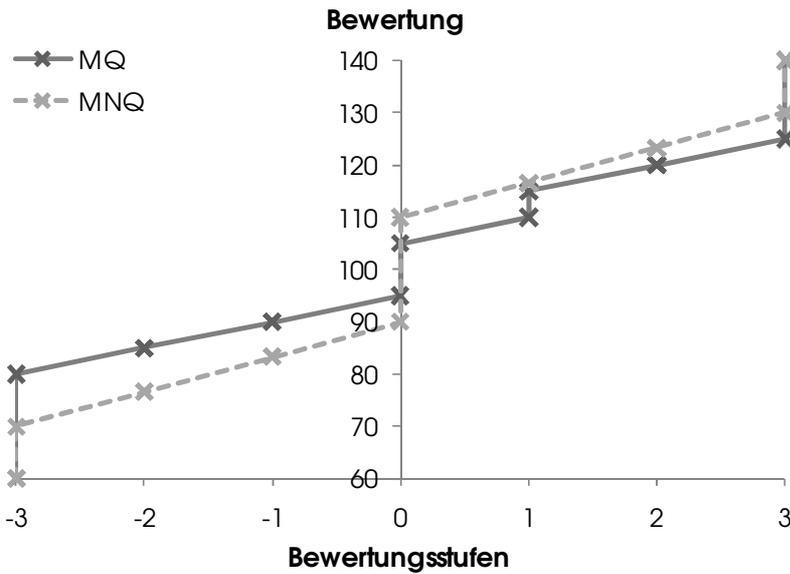


Abbildung 3.4: Graphische Darstellung der Bewertung der hydrologischen Kenngrößen.

Die Frage 3 bezieht sich auf die Bedeutung der hydrologischen Kenngrößen untereinander. Ist beispielsweise der Mittelwasserabfluss MQ für die Bewertung der ausgewählten Wassernutzung von größerer Bedeutung als der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ, so ist MQ höher zu gewichten als MNQ. Diese Gewichtung kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Wurde eine geringe Anzahl von Kenngrößen ausgewählt, so kann die Gewichtung frei, das heißt mit einer holistischen (~ ganzheitlichen, „aus dem Bauch heraus“) Einschätzung angegeben werden. Ist eine größere Anzahl von Kenngrößen zu gewichten, so kann die Methodik des Analytischen-Hierarchie-Prozesses (AHP) verwendet werden, die anhand von Paarvergleichen den Gewichtungsprozess besser strukturiert und damit erleichtert (SAATY 1980; SAATY 1990; SCHNEEWEIß 1991). Dieser Prozess wird in Kapitel 3.5.1 näher erläutert.

Wasserbedarf

Für die Bewertung des Wasserbedarfs hinsichtlich einer ausgewählten Wassernutzung sind ebenfalls drei Fragen zu beantworten. Diese beziehen sich jetzt allerdings auf die Entwicklungskenngrößen:

1. Welche Entwicklungskenngrößen sind für die Bewertung des Wasserbedarfs erforderlich?
2. Wie sind die ausgewählten Entwicklungskenngrößen zu bewerten?
3. Wie sind die ausgewählten Entwicklungskenngrößen untereinander zu gewichten?

Das weitere Vorgehen entspricht dabei dem oben beschriebenen. Lediglich bei Frage 2 werden andere Bewertungsstufen als beim Wasserdargebot verwendet. Hier reicht die Skala von „es wird sehr viel mehr Wasser als heute benötigt“ über „...viel mehr Wasser...“, „...mehr...“, „...gleich viel...“, „...weniger...“, „...viel weniger...“ bis „...sehr viel weniger Wasser...“.

Mit diesen Angaben zum Wasserdargebot und zum Wasserbedarf erstellt das WASKlim-EUS automatisch ein Fuzzy-Logik Regelsystem, das die Zustandsbewertung einzelner Wassernutzungen in Abhängigkeit von ausgewählten Klimaszenarien und Prognoseergebnissen zulässt und somit den Handlungsbedarf für die gewählte Wassernutzung ermittelt. Wie dies im Detail erfolgt wird in Kapitel 3.7, nach Vorstellung der einzelnen Methoden, ausführlich erläutert.

3.2.3. Maßnahmenbewertung

Liegt die Zustandsbewertung der betrachteten Wassernutzungen in einem ausgewählten Einzugsgebiet vor, d.h. ist der Handlungsbedarf bekannt, ist über eine Anpassungsmaßnahme zu entscheiden. Da bei dieser Entscheidung alle im Einzugsgebiet vorkommenden Wassernutzungen berücksichtigt werden müssen, sind hier lediglich prinzipielle Anpassungsmaßnahmen zu nennen, die im Einzugsgebiet zumindest theoretisch umgesetzt werden können. Angaben zu den Kosten und Detailangaben zu den vorgeschlagenen Maßnahmen sind zu diesem Zeitpunkt nicht zu bewerten. Daher wurden folgende Bewertungskriterien unabhängig von den Kosten ausgewählt:

- Nutzen kurz-/mittelfristig
- Nutzen langfristig
- Beitrag zum Klimaschutz
- Resilienz (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)
- Nutzungskonflikte / Machbarkeit (technisch, rechtlich, politisch)

Prinzipiell können aber auch andere Bewertungskriterien verwendet werden. Da jedoch für ein Einzugsgebiet ein einheitlicher Standard gelten sollte, wird empfohlen, einmal gewählte Kriterien auf alle betrachteten Anpassungsmaßnahmen anzuwenden. Da auch diese Bewertungen am besten von Experten vor Ort durchgeführt werden, wurden folgende Fragen in den Fragenkatalog aufgenommen. Auch hier beziehen sich alle Fragen auf eine Wassernutzung hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels:

1. Welche Anpassungsmaßnahmen sind für Ihre Wassernutzung zu empfehlen?
2. Wie sind die vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen zu bewerten?
3. Wie ist die Bedeutung der vorgegebenen Bewertungskriterien zu gewichten?

Die Bewertung in Frage 2 bezieht sich auf oben genannte Bewertungskriterien. Die vorgegebene sieben-stufige Bewertungsskala reicht dabei, ähnlich wie bei der Bewertung des Wasserdargebotes, von „äußerst schlecht“ über „sehr schlecht“, „schlecht“, „neutral“, „gut“, „sehr gut“ bis „äußerst gut“.

Die Gewichtung der Bewertungskriterien in Frage 3 kann, wie bei der Zustandsbewertung, entweder frei, d.h. holistisch, oder mit Hilfe des Analytischen-Hierarchie-Prozesses gewählt werden (Kapitel 3.5.1). Für die anschließende Auswertung der Befragungsergebnisse wird im WASKlim-EUS eine Bewertungsanalyse auf Basis einer Nutzwertanalyse verwendet, mit deren Hilfe die jeweilige Bewertung der vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahme errechnet wird. Ausführlich wird auch dies in Kapitel 3.7 vorgestellt.

3.2.4. Anpassungsstrategie mit Maßnahmenprogramm

Nachdem die Zustandsbewertungen aller Wassernutzungen und die möglichen Anpassungsmaßnahmen, ebenfalls getrennt nach Wassernutzungen, im Einzugsgebiet vorliegen, werden diejenigen Wassernutzungen herausgefiltert, die eine zukünftige negative Zustandsbewertung aufzeigen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Wassernutzungen, die zudem eine Verstärkung des Signals von der nahen zur fernen Zukunft aufweisen (Kapitel 3.7). Als nächstes werden lediglich die Anpassungsmaßnahmen näher betrachtet, die als Maßnahmen für die oben ausgewählten Wassernutzungen genannt wurden. Diese Maßnahmen sind nun genauer zu untersuchen, indem diese auch aus Sicht anderer Wassernutzungen bewertet werden. Dadurch können sowohl positive als auch negative Synergieeffekte berücksichtigt werden. Wurden beispielsweise die Wassernutzungen Brauchwasserversorgung und Gewässerzustand als „negative Wassernutzungen“ identifiziert, so kann die evtl. vorgeschlagene Anpassungsmaßnahme „Talsperre errichten“ sowohl für die Brauchwasserversorgung als auch für den Gewässerzustand in Form von Niedrigwasseraufhöhung einen positiven Effekt aufweisen. Hingegen könnten durch diese Maßnahme auch negative Effekte, beispielsweise hinsichtlich des Naturschutzes entstehen. Um diese positiven wie auch negativen Synergieeffekte berücksichtigen zu können, sind die oben ausgewählten Anpassungsmaßnahmen aus Sicht aller betrachteten Wassernutzungen zu bewerten.

Als nächstes ist eine Anpassungsstrategie zu wählen. Im WASKlim-EUS werden verschiedene Wassernutzungen betrachtet, die jedoch einen unterschiedlichen Stellenwert in der Gesellschaft einnehmen. Daher ist es im WASKlim-EUS möglich, die einzelnen betrachteten Wassernutzungen hinsichtlich ihrer übergeordneten Bedeutung für das Allgemeinwohl zu gewichten. So kann beispielsweise die Wassernutzung Trinkwasserversorgung in einer trockenen Region von größerer Bedeutung sein als die Wassernutzung Wasserkraftanlagen. Diese Gewichtungen können ebenfalls, wie bei der Bewertung des Wasserangebotes, holistisch oder mit Hilfe des Analytischen-Hierarchie-Prozesses (Kapitel 3.5.1) gewichtet werden. Die Ausprägung dieser Gewichtung gibt die Richtung der Anpassungsstrategie wieder.

Liegen schließlich diese Gewichtungen und die komplette Bewertung der Anpassungsmaßnahmen vor, wird daraus vom WASKlim-EUS die Gesamtbewertung einer jeden Maßnahme unter Berücksichtigung der Synergieeffekte berechnet.

Zu diesem Zeitpunkt können noch keine konkreten Herstellkosten der Anpassungsmaßnahmen genannt werden, jedoch sind diese i.d.R. als Größenordnung beschreibbar. Hinzu kommen weitere positive und negative Effekte, die im vorliegenden WASKlim-EUS nicht berücksichtigt werden könnten, jedoch auch von Bedeutung sind. Daher werden diese Punkte ebenfalls in der Expertenbefragung abgefragt und können somit verbal argumentativ in die Entscheidung der Anpassungsstrategie und -maßnahmen mit einfließen. Die Entscheidung über die tatsächliche Durchführung einer konkreten Anpassungsmaßnahme wird jedoch letztendlich Aufgabe der dafür vorbehaltenen politischen Gremien bleiben.

Zusammenfassend kann das neu entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem WASKlim-EUS mit folgendem Schaubild vereinfacht dargestellt werden (Abbildung 3.5).

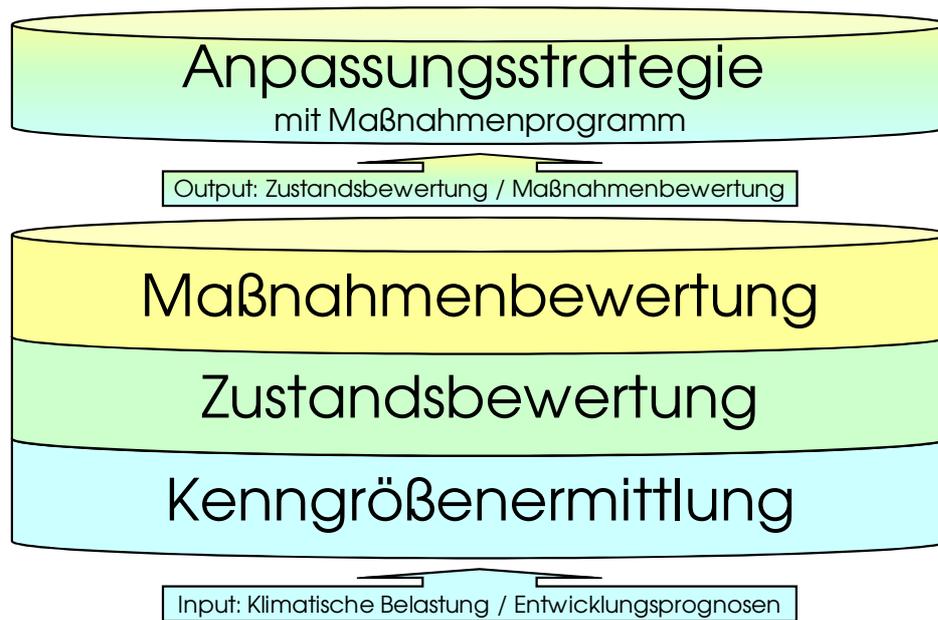


Abbildung 3.5: Zusammenfassendes Aufbauschema des WASKlim-EUS

Im Folgenden werden nun die oben angesprochenen Methoden und Verfahren des WASKlim-EUS näher vorgestellt, ein ausführliches Anwendungsbeispiel aufgezeigt und weiteres Entwicklungspotenzial dargestellt.

3.3 Baustein: Wasserhaushaltsmodell – WaSiM-ETH

Das **WasserhaushaltsSimulationsModell** WaSiM-ETH ist ein deterministisches, flächendifferenziert arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell zur Simulation des Wasserkreislaufes über und unter der Landoberfläche. Das Modell kann in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenbereichen eingesetzt werden und ist in der Lage, den hydrologischen Wasserkreislauf für Einzugsgebiete mit Größen von $< 1 \text{ km}^2$ bis zu mehreren 10.000 km^2 zu berechnen. Die zeitliche Auflösung des Modells reicht von Minuten bis zu mehreren Tagen. WaSiM-ETH kann sowohl für Kurzfrist- (Hochwasserereignisse) als auch für Langfristsimulationen (langjährige Wasserhaushaltssimulationen) verwendet werden (SCHULLA & JASPER 2009a).

3.3.1. Modellkonzept

Für die Simulation des Wasserhaushaltes werden in WaSiM-ETH physikalisch basierte Modellansätze verwendet. Für die Kalibrierung des Modells stehen zusätzlich konzeptionelle Parameter zur Verfügung. Die räumliche Differenzierung des Einzugsgebietes erfolgt in WaSiM-ETH durch die Einteilung des Gebietes in ein gleichmäßiges Gitternetz (genannt Grid). Die Rasterlänge kann dabei beliebig zwischen wenigen Metern und mehreren Kilometern gewählt werden. Durch den modularen Aufbau sind für die unterschiedlichen Niederschlags- und Abflussprozesse verschiedene Berechnungsansätze wählbar.

WaSiM-ETH ist in zwei Basismodellversionen verfügbar: Die ursprünglich entwickelte Version WaSiM-ETH I nutzt für die Simulation der Bodenwasserströme den konzeptionellen TOPMODEL-Ansatz (BEVEN & KIRKBY 1979). Die erweiterte Modellversion WaSiM-ETH II ersetzt diesen durch den prozessorientierten Richards-Ansatz, der den Wassertransport im Boden auf Grundlage von Potenzialgradienten und detaillierten bodenphysikalischen Eigenschaften berechnet (RICHARDS 1931).

Nachfolgend ist der modulare Aufbau von WaSiM-ETH dargestellt (Abbildung 3.6). Es sind sowohl die einzelnen Modellkomponenten als auch die simulierten vertikalen und lateralen Wasserflüsse skizziert. Die Module im grau unterlegten Bereich berechnen den Wasserfluss pro Gitterzelle, wohingegen Prozesse wie die Abflusskonzentration auf der Basis von Teilgebieten abgebildet werden.

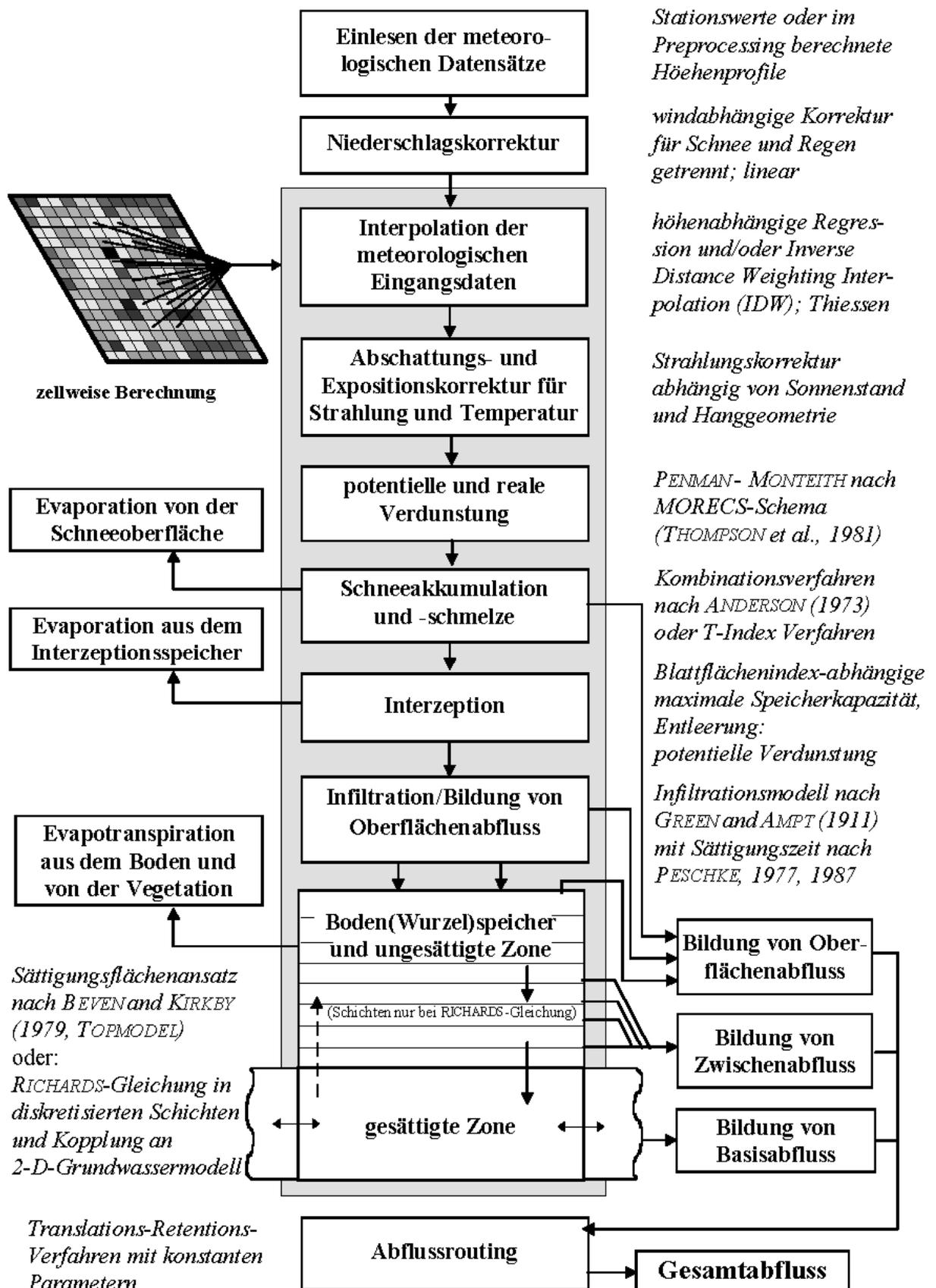


Abbildung 3.6: Modellstruktur von WaSiM-ETH (SCHULLA & JASPER 1998)

Nach Einlesen der meteorologischen Datensätze, wie Niederschlag, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Temperatur und Windgeschwindigkeit erfolgt bei Bedarf eine Niederschlagskorrektur nach SEVRUK (1986) und anschließend die Interpolation der Eingangsdaten auf die gewählte Rasterweite. Hierzu stehen verschieden Interpolationsansätze zur Verfügung (u.a. IDW, höhenabhängige Regression). Hinzu kommen Werkzeuge, um die Effekte von Hangneigung (Gefälle) und Hangausrichtung (Exposition) auf Abschattung und einfallende Strahlung und Temperatur berücksichtigen zu können (OKE 1987). Die Prozesse von Schneeeakkumulation und Schneeschmelze können mit Hilfe von Temperatur-Index-Verfahren oder einfachen Energiebilanz-Verfahren modelliert werden. Der Einfluss von vergletscherten Flächen auf die Wasserbilanz und das Abflussregime wird über ein separates Teilmodell erfasst. Die Evapotranspiration kann nach Penman-Monteith simuliert werden, jedoch stehen auch alternativ weniger datenintensive Verfahren, wie die Ansätze von Wendling, Hamon oder Haude zur Verfügung. Das Eindringen von Wasser in den Boden wird durch das auf den Infiltrationsansatz nach Green & Ampt aufbauende „Zweistufenmodell von Peschke“ beschrieben (GREEN & AMPT 1911). Dieses Infiltrationsmodell wird allerdings nur im WaSiM-ETH I (Topmodel) benutzt. In WaSiM-ETH II (Richards) werden dagegen die vertikalen Bodenwasserflüsse auf Basis der Richards-Gleichung bilanziert. Für das Abflussrouting im Gerinne verwendet WaSiM-ETH einen Translation-Retentions-Ansatz nach LIGHTHILL & WITHAM (1955).

3.3.2. Einsatzbereiche von WaSiM-ETH

Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH wurde ursprünglich für die Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen konzipiert (SCHULLA 1997). Mittlerweile existieren eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Diese lassen sich gliedern in Impaktanalysen für Flussgebiete wie Landnutzungsänderungen oder integrierte Flussgebietsanalysen, in Abflussvorhersagen, in Untersuchungen zur Grundwasserneubildung, in Ermittlung des Bodenwasser- und Stofftransportes im Boden sowie in Standortanalysen. Darüber hinaus bestehen Spezialanwendungen wie die Modellierung von Gletscherabflüssen, Bewässerungssteuerungen, und Abflussrekonstruktionen, um nur einige zu nennen. Weiter Anwendungsbeispiele sind SCHULLA & JASPER (2009b) zu entnehmen.

3.3.3. Eignung von WaSiM-ETH für das WASKlim-EUS

Prinzipiell können verschiedene Wasserhaushaltsmodelle für das WASKlim-EUS zum Einsatz kommen, sofern folgende Kriterien erfüllt werden:

- Möglichst genaue Abbildung des gesamten Wasserhaushaltsprozesses im Einzugsgebiet.
- Möglichst genaue Abbildung der Abflusskomponenten wie Grundwasserabfluss, Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss.
- Berechnung eines Simulationszeitraums von mehreren Dekaden.

Durch diese Forderungen scheidet gängige ereignisbasierte Niederschlags-Abfluss-Modelle aus, da diese i.d.R. für Kurzzeitereignisse, wie beispielsweise ein Hochwasserereignis, konzipiert wurden. Neben WaSiM-ETH existieren noch weitere Modelle wie beispielsweise das Modell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) (BREMICKER 2000), welches ebenso als Teil der Modellkette (Abbildung 3.3) für das WASKlim-EUS dienen könnte.

Kann neben dem Abflussgeschehen auch die Wassertemperatur der Bäche und Flüsse im Wasserhaushaltsmodell realistisch abgebildet werden, wäre dies für das WASKlim-EUS von Vorteil. Möglich ist dies derzeit lediglich im Modell LARSIM. Allerdings bestehen Überlegungen, wie das Modell WaSiM-ETH diesbezüglich erweitert werden kann (LEUNER et al. 2009). Zum aktuellen Zeitpunkt existiert dieser Modellbaustein jedoch noch nicht. Untersuchungen belegen jedoch, dass ein Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der Wassertemperatur besteht. Nach SCHIFFLER et al. (2008) entspricht die Änderung der Wassertemperatur in etwa dem sechstägigen Mittel der Lufttemperatur (Abbildung 3.7). Am Rhein und an verschiedenen anderen Flüssen in Deutschland konnte dies bestätigt werden. Daher wird diese Annahme für das WASKlim-EUS verwendet.

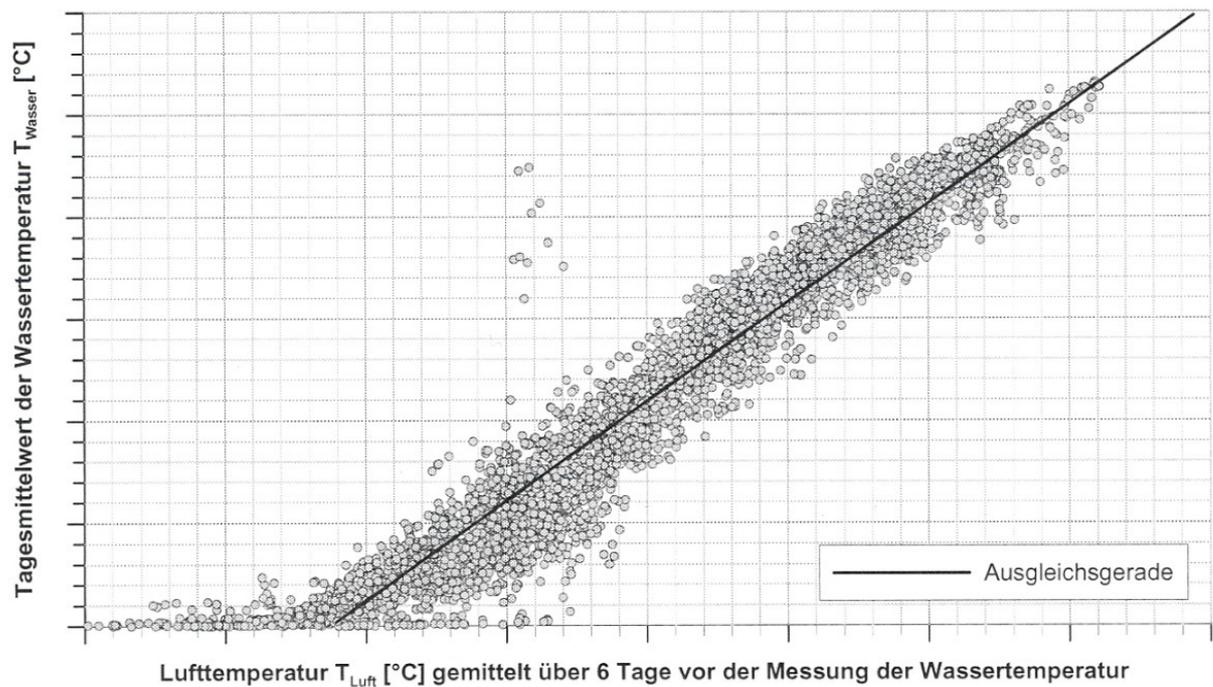


Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen Wasser- und Lufttemperatur (SCHIFFLER et al. 2008)

3.4 Baustein: Regelungsmethodik – Fuzzy-Logik

Die Disziplin „Fuzzy-Logik“ zählt zu dem Begriff „Soft-Computing“. Darunter versteht man Techniken, die sich an dem Vorbild der natürlichen Informationsverarbeitung orientieren. Hierzu zählen neben der Fuzzy-Logik auch Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, die Chaosforschung und hybride Systeme (z.B. Neurofuzzy). Der Begriff „Soft-Computing“ geht auf L. A. Zadeh an der University of California in Berkeley zurück, der zudem den ersten Aufsatz über die Fuzzy-Mengen-Theorie im Jahre 1965 verfasste. Er bezeichnet damit Techniken, bei denen nicht die exakten Lösungen im Vordergrund stehen, sondern vielmehr ausreichend gut approximierte Lösungen, so wie sie in der Natur ebenfalls existieren. Hinzu kommt die wesentliche Eigenschaft aus Erfahrung zu lernen, was bei der „klassischen“ Programmierung (Hard-Computing), die aus den Teilschritten Analyse des Problems, Erarbeiten eines Lösungsalgorithmus und Codierung besteht, nicht möglich ist (LIPPE 2006).

Die Methode der **Künstlichen Neuronalen Netze** (KNN) stellt dabei die älteste der Soft-Computing-Verfahren dar und reicht bis in die vierziger Jahre zurück. Diese Methode beruht auf der Abbildung der Arbeitsweise von Nervenzellen (Neuronen). Durch die Fähigkeit der KNN zur Selbstmodifikation ist der Lernvorgang gegeben. Unterschieden werden die Systeme nach ihrer Architektur (z. B. mit oder ohne Rückkopplung), nach ihrer Art zu lernen (überwacht, nicht überwacht) und ihrer Art der Selbstmodifikation. Da das Wissen, welches sich das KNN auf Grund von Beispielen angelernt hat, nicht extrahierbar ist, zählt diese Methode auch zu den „Black-Box“ Verfahren. Jedoch sind KNN in den Bereichen der Mustererkennung, der Prozesssteuerung, der Diagnose oder des Data-Mining konventionellen Verfahren meist überlegen (LIPPE 2006).

Evolutionäre Algorithmen gehen auf das von Darwin postulierte Evolutions-Prinzip zurück. Dabei unterliegt jede Population im Laufe der Generationen kleineren oder größeren Änderungen, die einzelne Individuen lebensfähiger, andere weniger lebensfähig erscheinen lassen. Das Prinzip beruht dabei auf der Mutation des Erbgutes, der Rekombination der Erbinformationen und der Selektion aufgrund der Tauglichkeit. Zu Beginn muss das zu lösende Problem in einer codierten Form vorliegen. Die Mutation des Erbgutes und die Rekombination erfolgt durch eine zufällige Veränderung des Codes. Mit Hilfe einer Gütefunktion, die das Zielkriterium beinhaltet, wird der Code solange verändert, bis das Ergebnis eine vorgegebene Güte erreicht. Ähnlich der Künstlichen Neuronalen Netze muss bei der Anwendung von Evolutionären Algorithmen keine detaillierte Kenntnis über den Lösungsalgorithmus vorhanden sein. Von großem Vorteil ist die geringe Anzahl von benötigten Beispieldaten um das System zu starten, jedoch stellt die geeignete Codierung und die Definition der Gütefunktion eine nicht zu unterschätzende Schwierigkeit dar (LIPPE 2006).

Mit Hilfe der **Chaos-Theorie**, welche auch als Theorie komplexer Systeme bezeichnet wird, kann das Verhalten rückgekoppelter nichtlinearer dynamischer Systeme modelliert werden. Der Begriff Chaos beschreibt dabei, anders als in der Umgangssprache, nicht den Zustand eines Systems, sondern sein zeitliches Verhalten, also seine Dynamik. Von großer Bedeutung für die Berechnung von komplexen nichtlinearen dynamischen Systemen sind dabei die Anfangsbedingungen, da kleine Differenzen exponentiell anwachsen (sogenannter Schmetterlingseffekt). Der Einzug der Chaosforschung in den Bereich des Soft-Computing erfolgte, als man versuchte, die Speicherungs- und Zugriffsmethoden innerhalb des menschlichen Gehirns zu modellieren. Es wurden interessante Modelle entwickelt, mit denen sich gewisse Phänomene erklären lassen konnten. Jedoch beschränkten sich die konkreten Anwendungen bisher auf Laborversuche (LIPPE 2006).

Die **Fuzzy-Mengen-Theorie** wurde von Lotfi A. Zadeh im Jahr 1965 verfasst (ZADEH 1965) und basiert, im Gegensatz zu der booleschen Logik, auf der Annahme, dass zwischen den Wahrheitswerten 1 (wahr) und 0 (falsch) noch weitere Werte existieren (mehrwertige Logik). Den Ansatz der mehrwertigen Logik findet man bereits in der griechischen Antike. Der Philosoph Platon (*428/7 v. Chr., † 347 v. Chr.) vermutete, dass zwischen den Grenzen „wahr“ und „falsch“ noch ein dritte Region liegt. Jedoch postulierte sein Schüler Aristoteles (*384 v. Chr., † 322 v. Chr.) das Gesetz vom ausgeschlossenen Dritten, das die Entwicklung logischer und mathematischer Systeme für die nächsten zwei Jahrtausende bestimmte (LIPPE 2006). Erst im 20. Jahrhundert führte J. Lukasiewicz eine systematische Alternative zu Aristoteles zweiwertiger Logik ein (LUKASIEWICZ 1957). Er zeigte, dass es Sätze gibt, denen die Wahrheitswerte „wahr“ oder „falsch“ nicht zugeordnet werden können. Hieraus schloss er auf einen „possible“ Bereich und entwickelte daraus später vier- und fünfwertige Logiken und nannte zudem die Möglichkeit, einer unendlichen Logik, bei der alle Zahlen aus dem Intervall $[0, 1]$ als Wahrheitswerte gelten (LIPPE 2006).

Schließlich veröffentlichte L. A. Zadeh im Jahr 1965 den grundlegenden Artikel „Fuzzy-Sets“ in dem er die Mathematik der „Fuzzy-Set-Theorie“ (dt.: unscharfe Mengenlehre) beschrieb (ZADEH 1965). In den darauffolgenden Jahren wurden die regelbasierten Fuzzy-Systeme, auch Fuzzy-Entscheidungssysteme genannt, eingeführt. Dabei können zwei wesentliche Anwendungsbereiche unterschieden werden. Zum einen die Prozesssteuerung, bei der ein konkreter Prozess so gesteuert werden soll, dass ein stabiler Zustand gehalten oder erreicht wird. Diese Systeme werden auch Fuzzy-Controller genannt. Zum anderen Expertensysteme, in denen Mustererkennungen oder andere Filteraufgaben getätigt werden müssen. Diese Systeme werden als Fuzzy-Expertensysteme oder auch als Fuzzy-Filter bezeichnet (LIPPE 2006).

Der Aufbau und die Funktionsweise beider Systeme sind dabei identisch. Die Basis ihrer Struktur bilden sogenannte „Wenn-Dann-Regeln“. L. A. Zadeh führte bereits 1972 regelbasierte Fuzzy-Systeme ein (ZADEH 1972; ZADEH 1973) und F. Mamdani und S. Assilian entwickelten die ersten Fuzzy-Controller (MAMDANI 1974, MAMDANI 1975). In der Praxis besitzen heute noch die so genannten Mamdani-Controller die größte Verbreitung. M. Sugeno und T. Takagi modifizierten den Mamdani-Controller zu einer effizienteren, aber bezüglich der Feinheit der Steuerung auch etwas eingeschränkten Variante, dem so genannten Sugeno-Controller (SUGENO 1985; SUGENO & TAKAGI 1985).

Die erste erfolgreiche technische Anwendung war die Steuerung von Zementbrennprozessen (HOLMBLAD & ØSTERGAARD 1982). Japan erkannte schon sehr früh das Potenzial der Fuzzy Regelungen und wendete dies beispielsweise in der U-Bahn von Sendai für das ruckfreie Anfahren bzw. Abbremsen und in vielen Konsumgütern an (TERANO et al. 1991; TRAEGER 1994). Mittlerweile werden Steuerungssysteme basierend auf der Fuzzy-Theorie in den verschiedensten Bereichen wie in der Elektrobranche bei Verwackelungsprozessen in Kameras oder bei Steuerungsprozessen in Waschmaschinen, aber auch in der Wasserwirtschaft beispielsweise bei der Turbinensteuerung oder bei der Hochwasservorhersage verwendet (DISSE et al. 2008).

3.4.1. Fuzzy-Entscheidungssystem

Ein Fuzzy-Entscheidungssystem kann dabei in die Bereiche Fuzzifizierung, Inferenz, welche aus der Entscheidungslogik und der Regelbasis besteht, und Defuzzifizierung aufgeteilt werden (Abbildung 3.8).

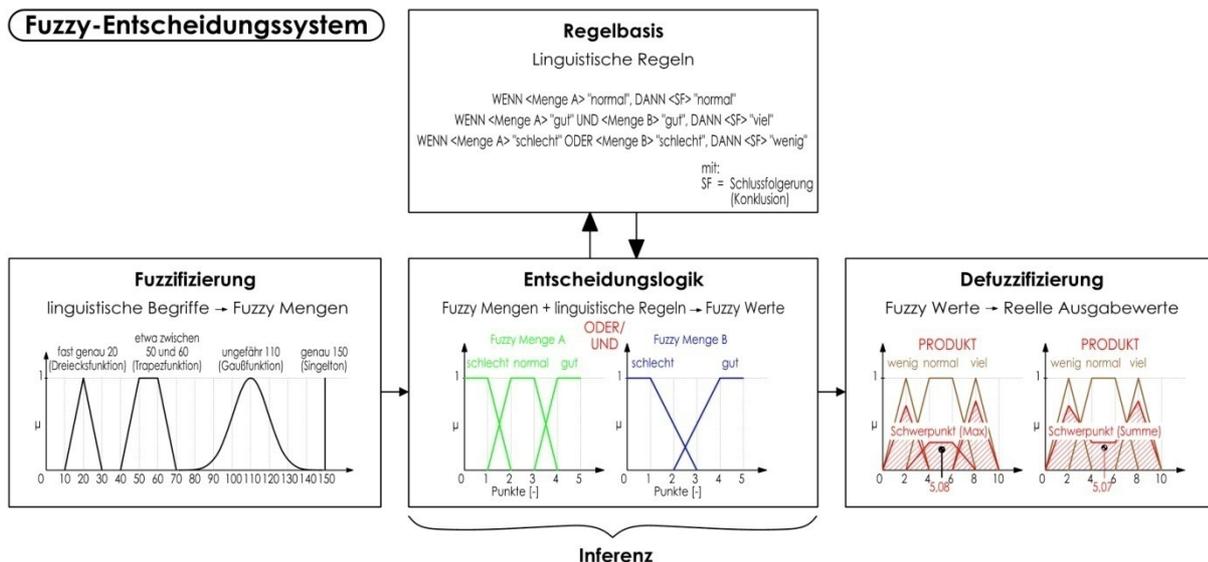


Abbildung 3.8: Fuzzy-Entscheidungssystem (~ unsharp Regelung) (in Anlehnung an LIPPE 2006 und TRAEGER 1994)

Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche **Fuzzifizierung**, **Inferenz** und **Defuzzifizierung** näher erläutert.

Fuzzifizierung

Bei der Fuzzifizierung werden linguistische Begriffe mathematisch erfasst. Das heißt, aus verbalen Eingabedaten werden Fuzzy-Mengen erzeugt. Dabei würde die klassische, zweiwertige Mengenlehre an ihre Grenzen stoßen. Begriffe wie „ziemlich kalt“ oder „es tut etwas weh“ sind nicht oder nur unzureichend beschreibbar. An diesem Punkt setzt die Fuzzy Mengenlehre ein. Im Gegensatz zu der klassischen Mengenlehre, in der lediglich die Wahrheitswerte 0 (100 % falsch) und 1 (100 % richtig) existieren, können mit Hilfe der Fuzzy Mengenlehre alle denkbaren Werte zwischen 0 und 1 möglich sein. Daraus ergibt sich, dass ein

Wahrheitswert zu einem bestimmten Anteil erfüllbar ist. Beispielsweise würde der Wert 0,6 bedeuten, dass die Aussage zu 60 % dem Wahrheitswert 1 und zu 40 % dem Wahrheitswert 0 zuzuordnen ist. Für Fuzzy-Mengen wird üblicherweise folgende Notation verwendet (ZIMMERMANN 1993):

G sei eine Grundmenge und $\mu_{\tilde{A}}(x)$ eine Funktion der Grundmenge G in das Einheitsintervall $[0,1]$ der reellen Achse, also $\mu_{\tilde{A}}(x): G \rightarrow [0,1]$. Dann heißt die Menge \tilde{A} aller Paare $(x, \mu_{\tilde{A}}(x))$ eine Fuzzy-Menge über G .

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in G\}$$

Definition 3.1: Definition einer Fuzzy-Menge (ZIMMERMANN 1993)

mit:

\tilde{A} = unscharfe Menge \tilde{A} (Fuzzy-Menge), Kennzeichnung durch Tilde

x = betrachtetes Element

$\mu_{\tilde{A}}$ = Zugehörigkeitsgrad zur unscharfen Menge \tilde{A}

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ = Zugehörigkeitsfunktion der Elemente x zur unscharfen Menge \tilde{A}

G = Grundmenge aller Elemente x

Die Funktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$ wird als Mitgliedsgrad- bzw. Zugehörigkeitsfunktion von \tilde{A} bezeichnet. Für ein $x \in G$ wird der Wert $\mu_{\tilde{A}}$ Zugehörigkeitsgrad, Erfüllungsgrad oder auch Mitgliedsgrad von x zu \tilde{A} genannt. Am einfachsten lässt sich eine Fuzzy-Menge graphisch darstellen. In den meisten Fällen zeigt die Zugehörigkeitsfunktion dabei folgenden Verlauf: Mit zunehmenden x steigt die Funktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$ bis zu einem Maximum an und anschließend fällt die Funktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$ bis zu einem Minimum ab. Dabei stellen $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$ und $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$ die Grenzen der Menge dar. Da sich meist zwei oder mehr Fuzzy-Mengen überlappen, wird durch den Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion, die Fuzzy-Menge exakt beschrieben. Im Folgenden werden oben genannte Begriffe der Fuzzy-Mengen Theorie graphisch erläutert (Abbildung 3.9).

Begriffsdefinitionen

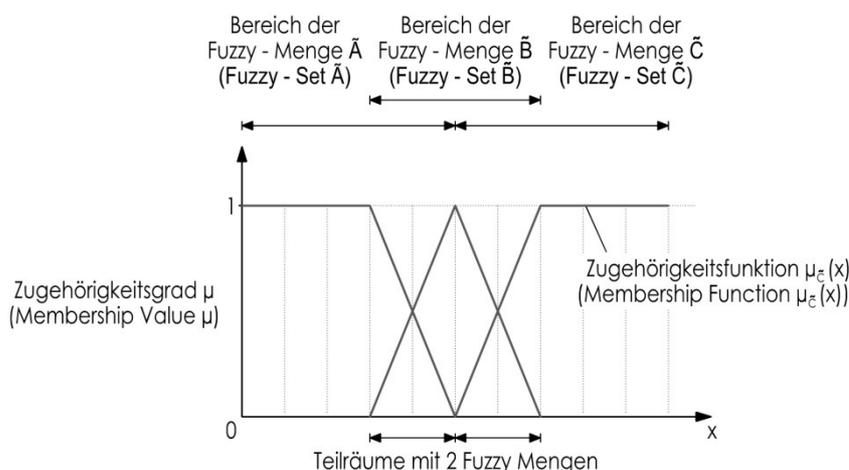


Abbildung 3.9: Begriffsdefinitionen Fuzzy-Mengen

Bei der Fuzzifizierung werden aus linguistischen Begriffen Fuzzy-Mengen und die dazu gehörenden Zugehörigkeitsfunktionen erstellt. Möchte man beispielsweise eine Anzahl von Menschen nach der Körpergröße gruppieren, so muss man vorab die jeweiligen Grenzen festlegen. Ein kleiner Mensch könnte beispielsweise zu 100% als „Klein“ bezeichnet werden, wenn er kleiner als 1,65 m ist. Ein „Mittel“-großer Mensch könnte mit 1,75 m beschrieben werden und ein „Großer“ Mensch ab einer Größe von 1,85 m. Was jedoch dazwischen liegt, hängt sehr stark vom Entscheidungsträger ab. Die Abbildung 3.10 zeigt eine mögliche Darstellung der Körpergröße nach der Fuzzy-Theorie für drei Bereiche. Soll nun ein 1,72 m großer Mensch einer Gruppe zugeordnet werden, würde dies nach der klassischen Mengenlehre nicht möglich sein, da er keiner Gruppe zu 100 % zugehört. Nach der Fuzzy-Mengenlehre ist dieser Mensch entsprechend dem Beispiel in Abbildung 3.10 jedoch zu 30 % zu den „Kleinen“ und zu 70 % zu den „Mittel“-großen Menschen zuordenbar. Die Gesamtheit der Zugehörigkeitsfunktionen aus Abbildung 3.10 werden als Fuzzy-Relation bezeichnet.

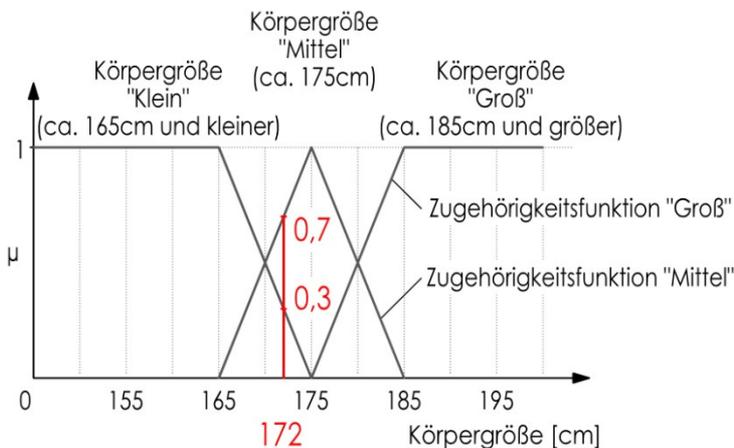


Abbildung 3.10: Umwandlung von linguistischen Begriffen in Fuzzy-Mengen

Das Intervall zwischen den „Kleinen“ und den „Mittleren“ Menschen muss nicht mit einer linearen Funktion aufgefüllt werden. Prinzipiell sind hier verschiedenste Funktionen denkbar. Abbildung 3.11 zeigt gängige Zugehörigkeitsfunktionen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die meisten Fälle sehr gut mit Dreiecks- und Trapezfunktionen abgebildet werden können.

Linguistische Begriffe können folgendermaßen fuzzifiziert werden:

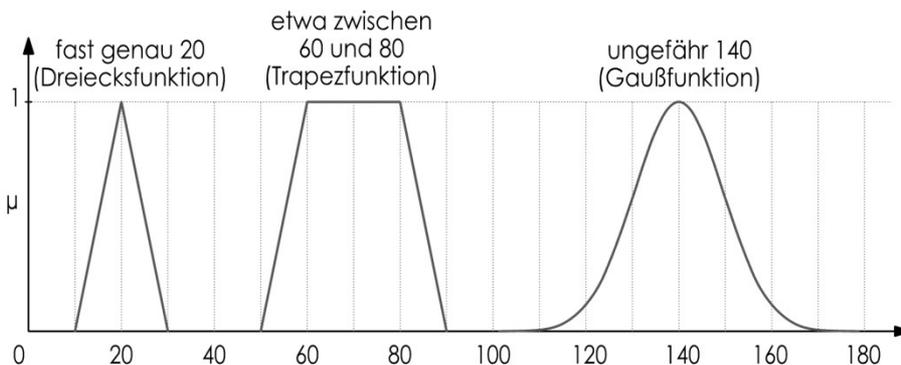


Abbildung 3.11: Fuzzifizierung linguistischer Begriffe

Inferenz

Nach der Fuzzifizierung, also der Erstellung der Eingabe-Fuzzy-Mengen und der Zugehörigkeitsfunktionen, die den Sachverhalt beschreiben, folgt die Inferenz. Diese besteht aus zwei wesentlichen Elementen, dem Aufstellen der Regelbasis und der Entscheidungslogik.

Regelbasis

Die linguistische Regelbasis gibt darüber Aufschluss, in welcher Art und Weise die Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen mehrerer Fuzzy-Mengen miteinander verknüpft werden. Die Vorgehensweise für das Aufstellen der Verarbeitungsregeln ähnelt dabei dem menschlichen Denken. Einfache Wenn-Dann-Beziehungen werden dabei in einem Regelwerk zusammengefasst. Eine Wenn-Dann-Regel weist dabei folgende Form auf:

WENN <Prämisse> DANN <Schlussfolgerung (Konklusion)>

Definition 3.2: Definition einer WENN-DANN-Regel

Bei mehreren Prämissen:

WENN <Prämisse1> UND/ODER <Prämisse2> DANN <Schlussfolgerung>

Definition 3.3: Definition einer gekoppelten WENN-DANN-Regel

Die Schlussfolgerung wird auch als Konklusion bezeichnet. Beim Aufstellen der Regeln ist es von besonderer Bedeutung, dass keine undefinierten Zustände auftreten. Sämtliche Prämissenkombinationen müssen in dem Regelwerk enthalten sein. Das heißt, es muss für jede Fuzzy-Menge mindestens eine Verarbeitungsregel existieren (TRAEGER 1994).

Entscheidungslogik

Im Rahmen der Entscheidungslogik werden aus den Verarbeitungsregeln der Regelbasis und der Eingabe-Fuzzy-Mengen, die durch die Fuzzifizierung entstehen, die Schlussfolgerungen (Konklusion) der Ausgabe-Fuzzy-Mengen berechnet. Zudem gibt die Entscheidungslogik darüber Aufschluss, in welcher Art und Weise die verschiedenen Fuzzy-Mengen miteinander verkettet werden.

In den Bereich der Entscheidungslogik werden drei Berechnungsschritte gezählt:

- a. *Berechnung des Erfüllungsgrades einer Prämisse (Komposition)*
- b. *Berechnung des Ergebnisses einer Regel (Konklusion)*
- c. *Berechnung der Ausgabe-Fuzzy-Mengen (Aggregation)*

a. *Berechnung des Erfüllungsgrades einer Prämisse (Komposition)*

In der Theorie der Fuzzy-Entscheidungslogik stehen UND- bzw. ODER-Operatoren für die Berechnung des Erfüllungsgrades einer Prämisse zur Verfügung, die jeweils unterschiedlich umgesetzt werden können. Welche Art richtig bzw. falsch ist, kann für gewöhnlich nicht im Voraus festgelegt werden. Der Erfolg des Systems gibt darüber Aufschluss, welcher Operator der am besten geeignetste ist.

UND-Komposition:

Die gebräuchlichsten Operatoren für die UND-Komposition $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ zweier Fuzzy-Mengen sind:

1. Minimum-Operator

$$\mu_{\tilde{A} \text{ UND } \tilde{B}}(x) = \min \{ \mu_{\tilde{A}}(x); \mu_{\tilde{B}}(x) \} \quad \text{Gleich. (3.3)}$$

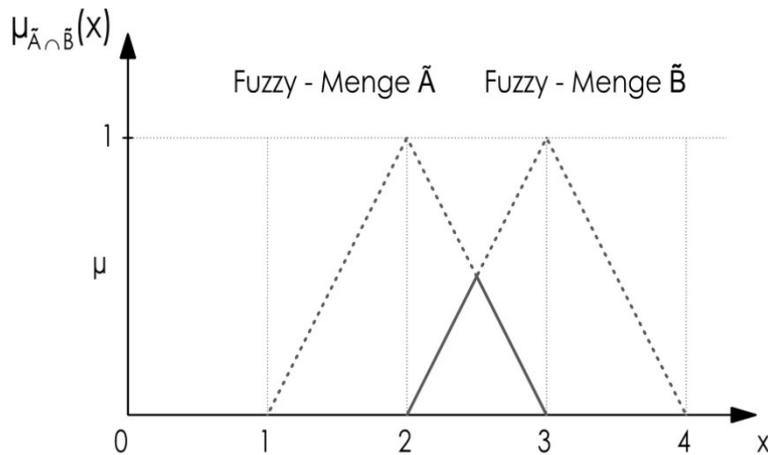


Abbildung 3.12: Minimum-Operator einer UND-Komposition zweier Fuzzy-Mengen

2. Produkt-Operator

$$\mu_{\tilde{A} \text{ UND } \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x) \quad \text{Gleich. (3.4)}$$

3. Modifizierter-Operator

$$\mu_{\tilde{A} \text{ UND } \tilde{B}}(x) = \max\{0; [\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - 1]\} \quad \text{Gleich. (3.5)}$$

ODER-Komposition:

Die gebräuchlichsten Operatoren für die ODER-Komposition $\tilde{A} \cup \tilde{B}$ zweier Fuzzy-Mengen sind:

1. Maximum-Operator

$$\mu_{\tilde{A} \text{ ODER } \tilde{B}}(x) = \max\{\mu_{\tilde{A}}(x); \mu_{\tilde{B}}(x)\} \quad \text{Gleich. (3.6)}$$

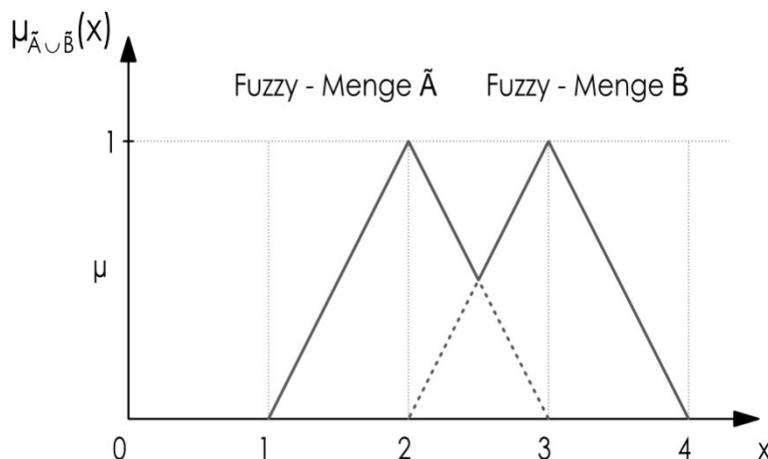


Abbildung 3.13: Maximum Operator einer ODER-Komposition zweier Fuzzy-Mengen

2. Probabilistischer-Operator

$$\mu_{\tilde{A} \text{ ODER } \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x) \quad \text{Gleich. (3.7)}$$

3. Modifizierter-Operator

$$\mu_{\tilde{A} \text{ ODER } \tilde{B}}(x) = \min\{1; [\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x)]\} \quad \text{Gleich. (3.8)}$$

b. Berechnung des Ergebnisses einer Regel (Konklusion)

Für die Berechnung der Schlussfolgerung (Konklusion) einer Verarbeitungsregel existieren verschiedene Ansätze. Prinzipiell wird der Wert des Zugehörigkeitsgrades der Eingabe-Fuzzy-Menge aus der Prämisse für den Zugehörigkeitsgrad der Ausgabe-Fuzzy-Menge übernommen. Bei mehreren Prämissen werden die Werte der einzelnen Zugehörigkeitsgrade nach den Regeln der Fuzzy-Entscheidungslogik (Bereich Komposition) miteinander verknüpft. Die Berechnung der Schlussfolgerung kann anschließend nach folgenden, gängigsten Methoden durchgeführt werden (Implikation).

Minimum-Implikation:

Bei der Minimum-Methode wird die Zugehörigkeitsfunktion der Ausgabe-Fuzzy-Menge auf Höhe des Zugehörigkeitsgrades aus der Prämisse abgeschnitten. Dies wird auch Clipping genannt (Abbildung 3.14). Die Eingabe-Fuzzy-Menge und die Ausgabe-Fuzzy-Menge müssen dabei nicht zwingend die gleiche Form aufweisen.

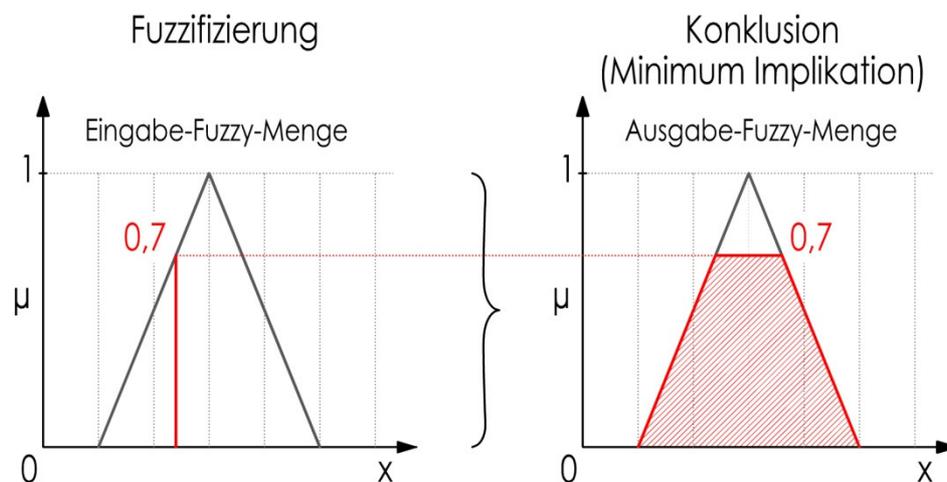


Abbildung 3.14: Minimum-Implikation

Produkt-Implikation:

Bei der Produkt-Methode wird die Zugehörigkeitsfunktion der Ausgabe-Fuzzy-Menge mit Hilfe des Zugehörigkeitsgrades aus der Prämisse multipliziert (Abbildung 3.15).

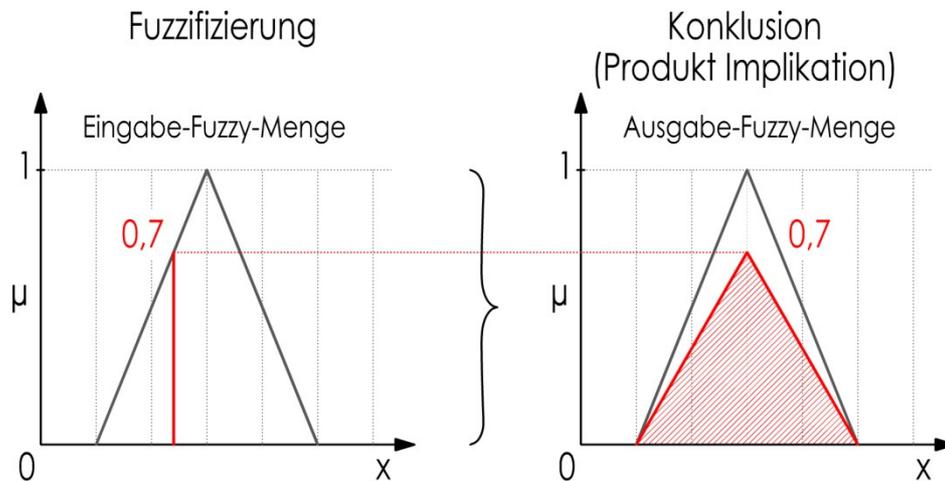


Abbildung 3.15: Produkt-Implikation

c. Berechnung der Ausgabe-Fuzzy-Mengen (Aggregation)

Mit Hilfe der Implikationsmethoden kann für jede Regel eine Antwort in Form von Flächen berechnet werden. Diese einzelnen Flächen sind wiederum zu einer Gesamtfläche (Ergebnismenge) zusammenzufassen. Dieser Vorgang wird Aggregation genannt. Auch hier existieren verschiedene Möglichkeiten. Die gängigsten sind die Probabilistische-ODER-, die Maximum- und die Summen-Aggregation. Die Berechnung der Probabilistischen-ODER- und der Maximum-Aggregation erfolgt dabei wie bei der ODER-Komposition.

Probabilistische-ODER-Aggregation:

Bei der Probabilistischen-ODER-Aggregation werden zuerst die Summen der Schlussfolgerungen der Ausgabe-Fuzzy-Mengen gebildet und anschließend das jeweilige Produkt abgezogen.

Maximum-Aggregation:

Bei der Maximum-Aggregation werden die Flächen der Schlussfolgerungen (Konklusion) der Ausgabe-Fuzzy-Mengen zu einer Gesamtfläche überlagert (Abbildung 3.16).

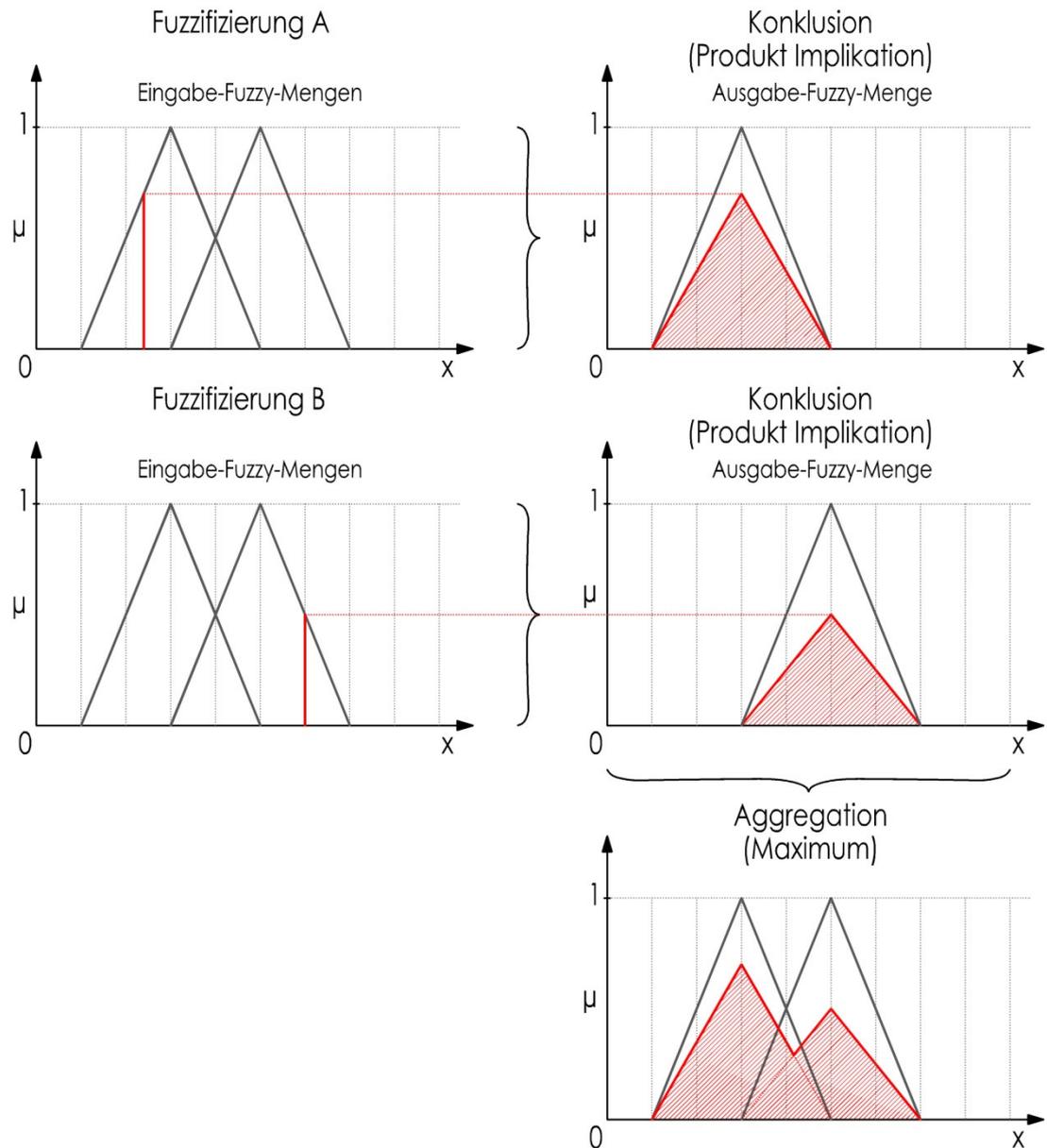


Abbildung 3.16: Maximum-Aggregation

Summen-Aggregation:

Bei der Summen-Aggregation werden die Flächen der Schlussfolgerungen (Konklusion) der Ausgabe-Fuzzy-Mengen zu einer Gesamtfläche superpositioniert, d.h. es wird die Summe von allen Schlussfolgerungen gebildet (Abbildung 3.17).

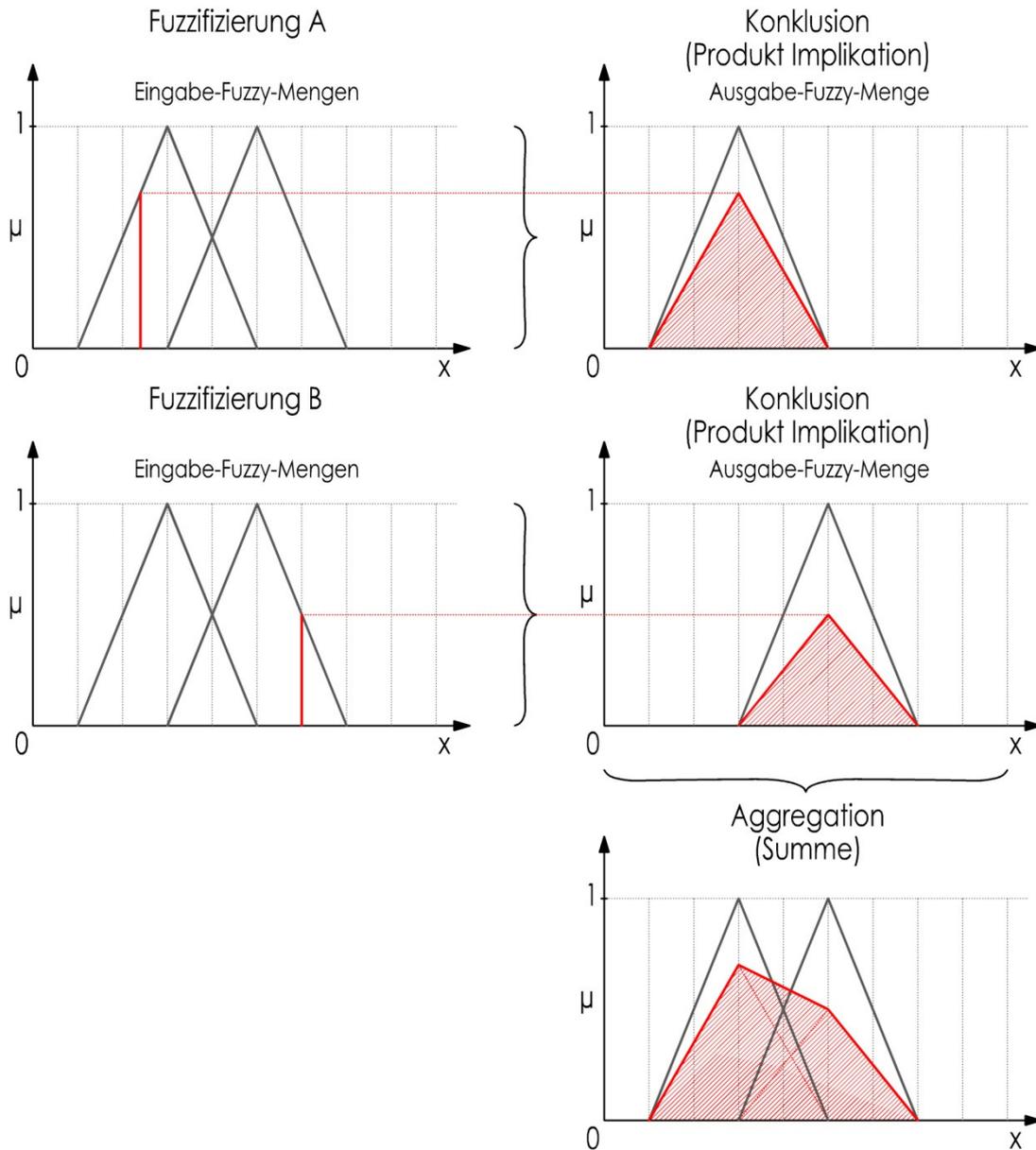


Abbildung 3.17: Summen-Aggregation

Defuzzifizierung

Für die Defuzzifizierung, das heißt, die Berechnung eines reellen Ausgabewertes aus einem Fuzzy-Entscheidungssystem, stehen ebenfalls verschiedene Methoden zur Verfügung. Im Folgenden werden die zwei gängigsten vorgestellt:

Maximum-Mittelwert-Methode („Mean of Maximum“)

Bei der Maximum-Mittelwert-Methode wird der Abszissenwert unter der Mitte des Maximalwertes der Ergebnismenge verwendet (Abbildung 3.18).

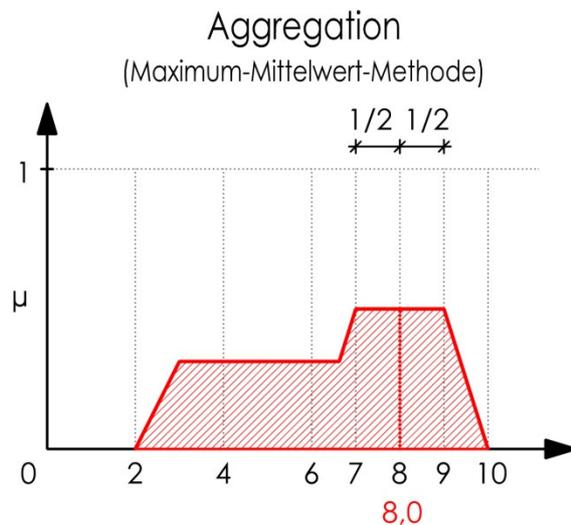


Abbildung 3.18: Defuzzifizierung "Maximum-Mittelwert-Methode"

Schwerpunkt-Methode („Center of Gravity“)

Bei der Schwerpunkt-Methode wird der Abszissenwert, der den Flächenschwerpunkt der Ereignismenge darstellt, verwendet (Abbildung 3.19).

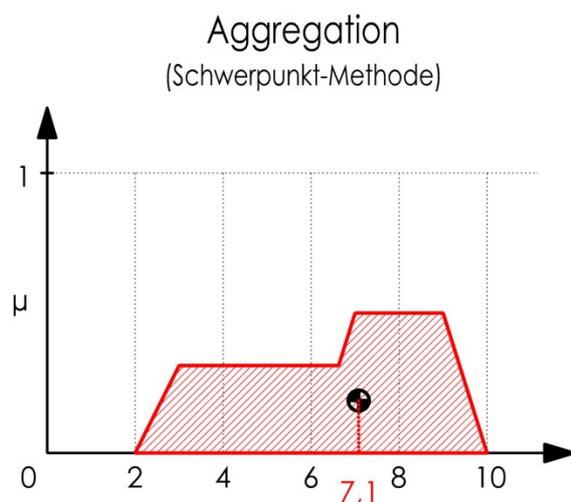


Abbildung 3.19: Defuzzifizierung "Schwerpunkt-Methode"

Im Folgenden wird die oben erläuterte Fuzzy-Logik anhand eines Beispiels anschaulich dargestellt.

3.4.2. Beispiel Fuzzy-Logik „Wärmekraftanlagen“

Im Folgenden werden Varianten gezeigt, die jeweils gleich fuzzifiziert wurden, den gleichen Verarbeitungsregeln unterliegen und auf der gleichen Entscheidungslogik basieren. Jedoch erfolgen die Komposition und die Aggregation auf unterschiedliche Art und Weise.

Das folgende Beispiel zeigt mögliche Zustandsbewertungen einer Wärmekraftanlage unter dem Hintergrund eines sich ändernden Wasserdargebotes. Anhand zweier Eingangsgrößen (Bewertungskriterien) wird eine Auswahl an verschiedenen Konklusions-, Implikations-, Aggregations- und Defuzzifizierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Eingangsgrößen stellen im vorliegenden Beispiel den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) und die Unterschreitungsdauer von MNQ ($UZ < MNQ$) für ein Sommerhalbjahr dar. Die Bewertung erfolgt entsprechend der prozentualen Änderung der Eingangsgrößen. Bei der Ermittlung der Zugehörigkeitsfunktionen wurde versucht, eine realistische Fuzzifizierung der verschiedenen Bewertungsgrößen (äußerst schlecht, sehr schlecht, schlecht, zufriedenstellend, gut, sehr gut, äußerst gut) zu finden. Die Varianten 1 und 2 weisen jeweils eine Prämisse auf, die Varianten 3 bis 6 hingegen zwei (Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.24). Die Eingabe-Fuzzy-Mengen wurden anhand fiktiver Einschätzungen zu MNQ (S) aufgestellt. Hingegen wurden die Ausgabe-Fuzzy-Mengen, wie beim WASKlim-EUS, als regelmäßige Dreiecksfunktionen zwischen „-3“ und „+3“ festgelegt.

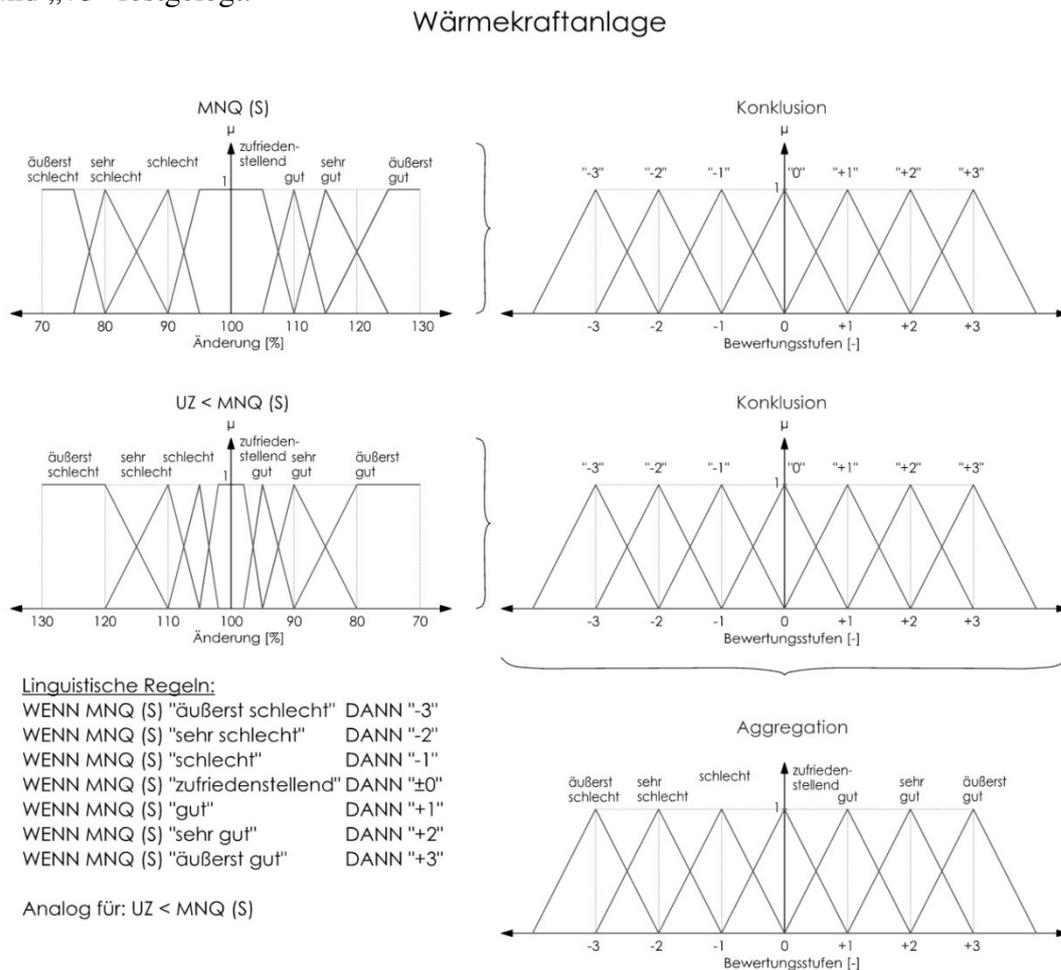


Abbildung 3.20: Fuzzy-Entscheidungslogik am Beispiel einer Wärmekraftanlage

Variante 1:

Beispiel für eine Produkt-Implikation, eine Maximum-Aggregation und eine Defuzzifizierung nach der Schwerpunktmethode für ein gewähltes MNQ (S) von 93 % (leichte Abnahme) und ein $UZ < MNQ$ (S) von 106 % (leichte Zunahme) (Abbildung 3.21).

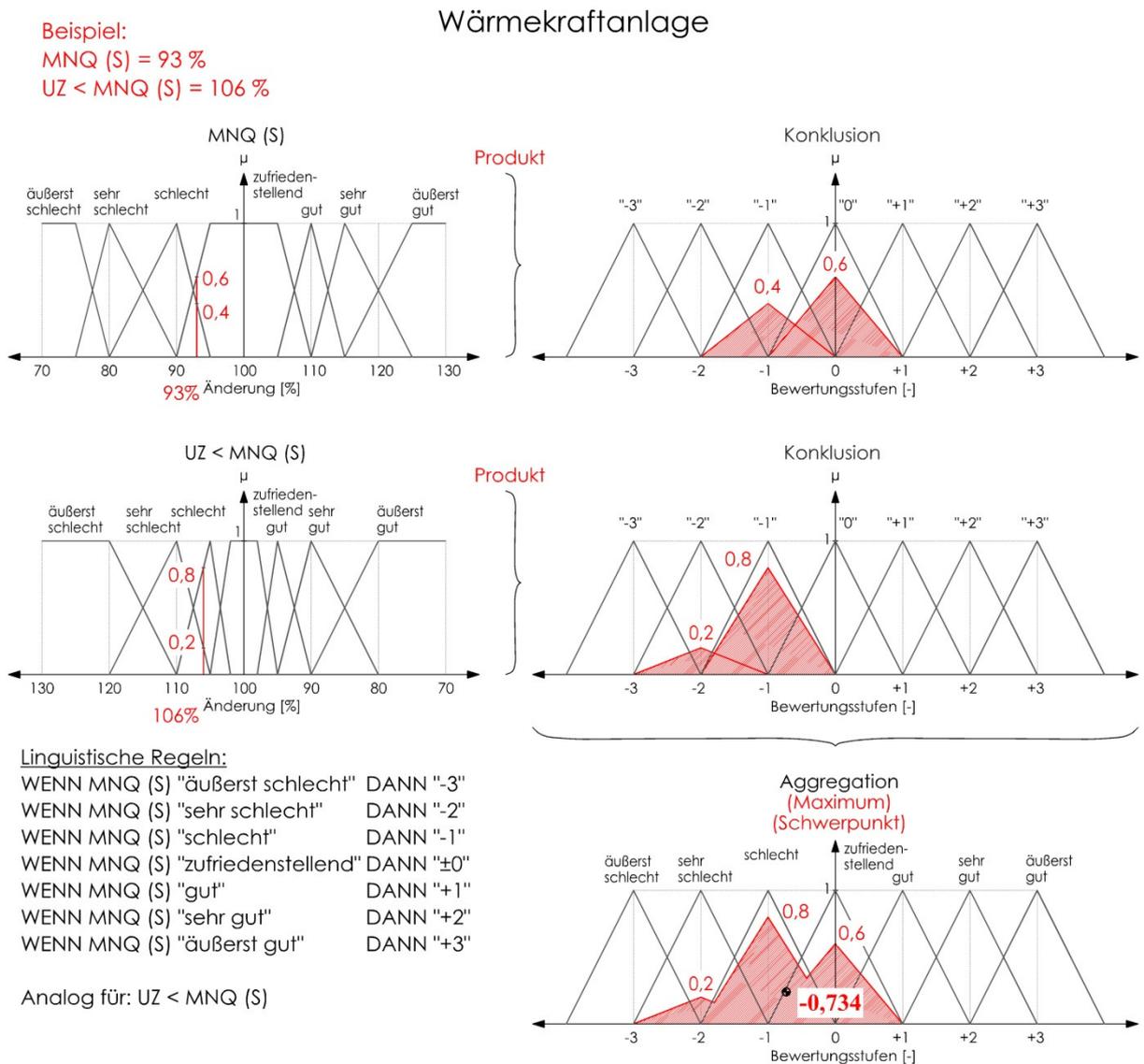


Abbildung 3.21: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 1

Der reelle Ausgabewert der Variante 1 beträgt -0,734. Dies entspricht einer Bewertungsstufe für den zukünftigen Zustand zwischen „zufriedenstellend“ und „schlecht“.

Variante 2:

Beispiel für eine Produkt-Implication, eine Summen-Aggregation und eine Defuzzifizierung nach der Schwerpunktmethode (Abbildung 3.22).

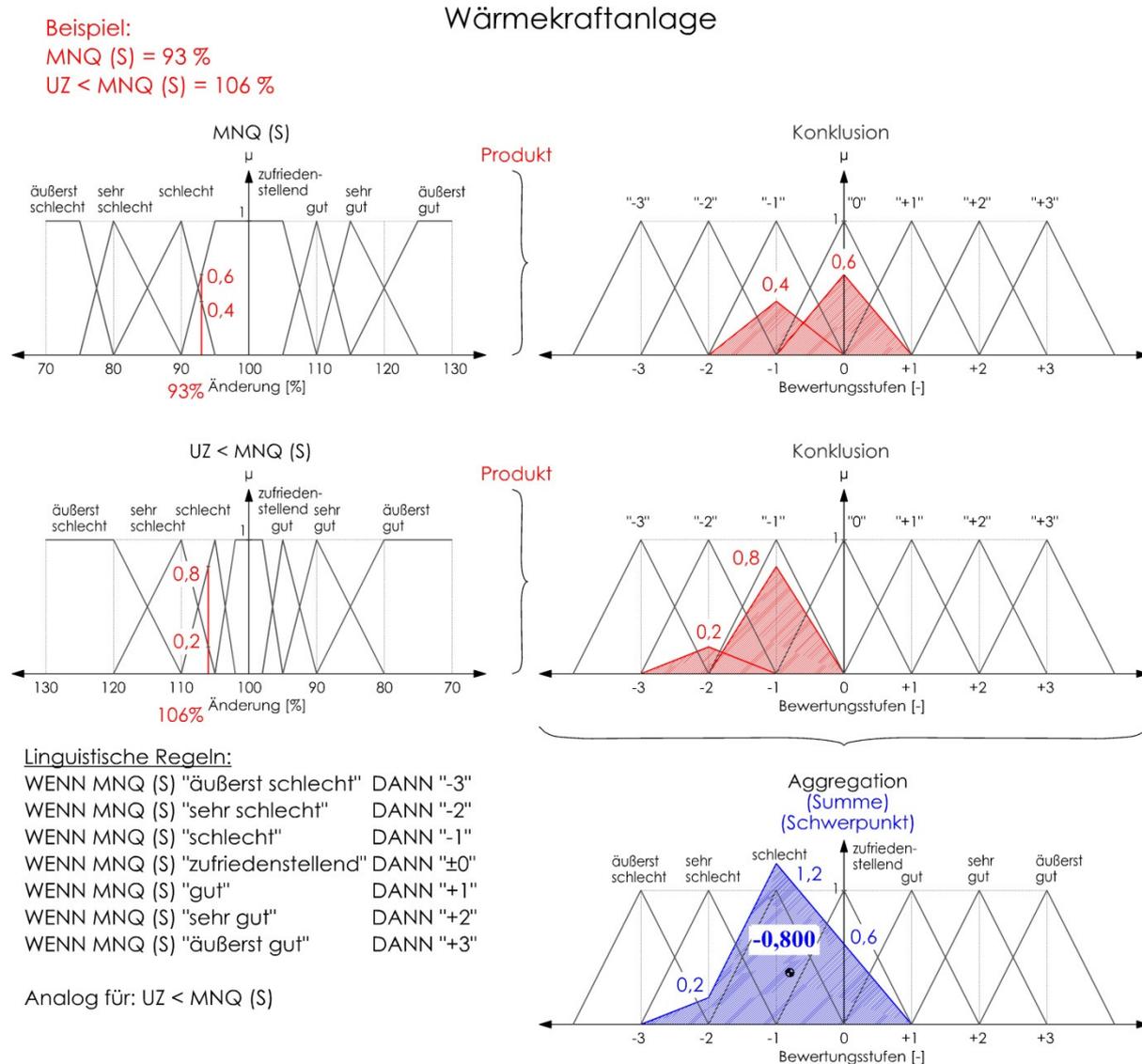


Abbildung 3.22: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 2

Der reelle Ausgabewert der Variante 2 beträgt -0,80. Dies entspricht ebenfalls einer Bewertungsstufe für den zukünftigen Zustand zwischen „zufriedenstellend“ und „schlecht“.

Variante 3/4:

Beispiel für eine ODER-Komposition, eine Produkt-Implikation, eine Maximum-Aggregation (rot) bzw. eine Summen-Aggregation (blau) und eine Defuzzifizierung nach der Schwerpunktmethod (Abbildung 3.23).

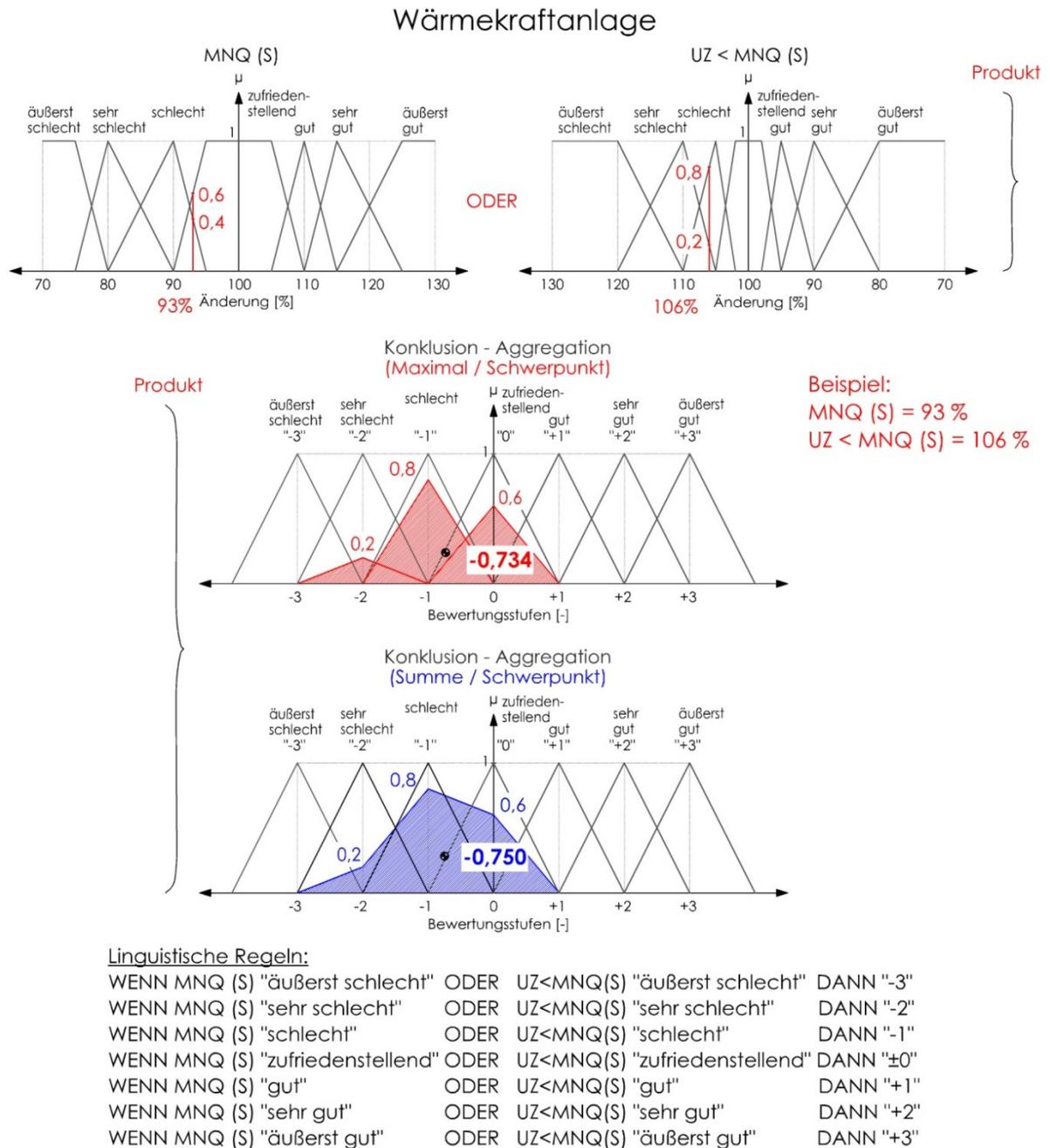


Abbildung 3.23: Beispiel WärmeKraftanlagen – Variante 3 und 4

Bei einer Änderung der hydrologischen Kenngröße „MNQ (S)“ auf 93 % werden die Eingabe-Fuzzy-Mengen „zufriedenstellend“ zu 60 % und „schlecht“ zu 40 % erfüllt. Beträgt die Änderung der Kenngröße „UZ<MNQ (S)“ 106 %, werden die Eingabe-Mengen „schlecht“ zu 80 % und „sehr schlecht“ zu 20 % erfüllt. Da die Verknüpfung nach der ODER-Komposition erfolgt, ist die Vereinigungsmenge beider Kenngrößen zu bilden. Daher werden die Ausgabe-

Mengen „sehr schlecht“ zu 20 %, „schlecht“ zu 80 % und „zufriedenstellend“ zu 60 % erfüllt. Der reelle Ausgabewert der Variante 3 (Maximum-Aggregation) beträgt demnach -0,734 und bei Variante 4 (Summen-Aggregation) -0,750. Dies entspricht in beiden Fällen einer Bewertungsstufe für den zukünftigen Zustand zwischen „zufriedenstellend“ und „schlecht“.

Variante 5/6:

Beispiel für eine UND-Komposition, eine Produkt-Implikation, eine Maximum-Aggregation (rot) bzw. eine Summen-Aggregation (blau) und eine Defuzzifizierung nach der Schwerpunktmethode (Abbildung 3.24).

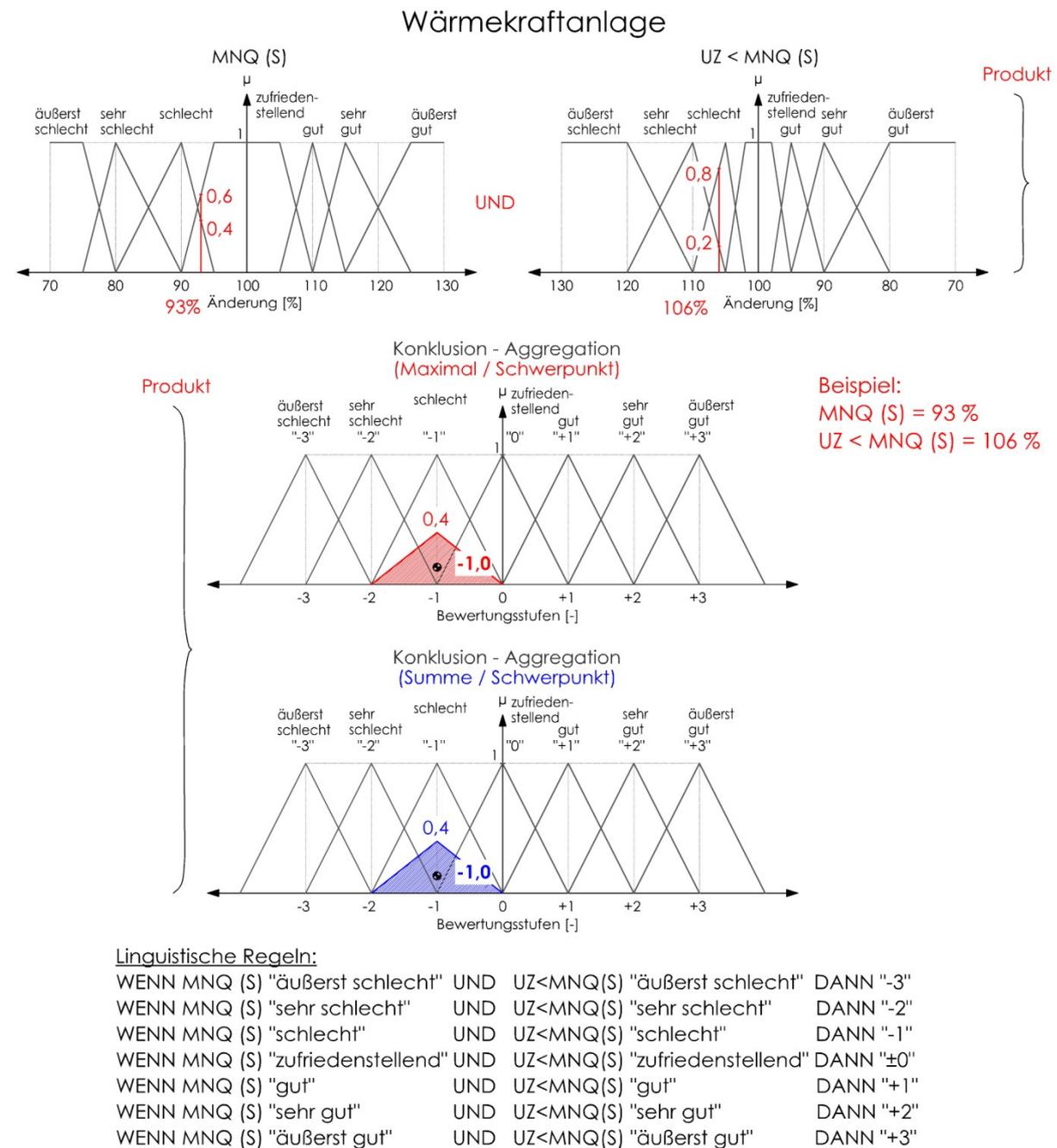


Abbildung 3.24: Beispiel Wärmekraftanlagen – Variante 5 und 6

Bei Variante 5 und 6 erfolgt die Verknüpfung nach der UND-Komposition, d.h. es ist die Schnittmenge beider Kenngrößen zu bilden. In diesem Fall besteht lediglich für die Zugehörigkeitsfunktion „schlecht“ für „MNQ (S)“ und „UZ<MNQ (S)“ eine Übereinstimmung von 40 % (kleinster Erfüllungsgrad). Daher wird ebenfalls bei der Fuzzy-Ausgabe-Menge „schlecht“ ein Erfüllungsgrad von 40 % erreicht (Abbildung 3.24). Die reellen Ausgabewerte der Varianten 5 und 6 betragen jeweils -1,0, was einer Bewertungsstufe von „schlecht“ entspricht. In Tabelle 3.4 ist eine Übersicht der verschiedenen Varianten 1-6 dargestellt:

Tabelle 3.4: Vergleich der verschiedenen Fuzzy-Inferenz Methoden

Variante	Komposition	Implikation	Aggregation	Defuzzifizierung	Antwort
V 1	getrennt	Produkt	maximal	Schwerpunkt	-0.734
V 2	getrennt	„	Summe	„	-0.800
V 3	ODER	„	maximal	„	-0.734
V 4	ODER	„	Summe	„	-0.750
V 5	UND	„	maximal	„	-1.000
V 6	UND	„	Summe	„	-1.000

Aus Tabelle 3.4 ist ersichtlich, dass in Variante 1 mit getrennter Komposition und in Variante 3 mit einer ODER Komposition das gleiche Ergebnis ermittelt wurde. In dem neu entwickelten WASKlim-EUS wird die Variante 1 verwendet. Prinzipiell sind auch andere Varianten denkbar. Im vorliegenden Fall erwies sich jedoch die Variante 1 als vollkommen ausreichend. In bestimmten Konstellationen wäre auch die Variante 5 mit einer UND Komposition denkbar. Das ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn zwei Kenngrößen voneinander abhängen und nur durch die Kombination dieser zwei Kenngrößen sich ein maßgeblich anderer Zustand einstellt als ohne die Kombination. Beispielsweise könnte dies der Fall sein, wenn die Kenngrößen „Volumen Hochwasserspeicher“ und die hydrologische Kenngröße „Hochwasserabfluss“ von Bedeutung sind. Eine mögliche Regel könnte dann lauten: WENN <Volumen Hochwasserspeicher> voll UND <Hochwasserabfluss> groß DANN Zustand „äußerst schlecht“. Eine weitere Regel könnte dann lauten: WENN <Volumen Hochwasserspeicher> leer UND <Hochwasserabfluss> groß DANN Zustand „zufriedenstellend“. Würden diese Kenngrößen alleine betrachtet werden, könnte man diese Eigenschaften nicht berücksichtigen.

3.4.3. Einsatzbereiche von Fuzzy-Logik

Die Einsatzbereiche der Fuzzy-Logik gliedern sich gemäß der Aufgabenstellung. Ursprünglich wurde die Fuzzy-Logik entwickelt, um aus einem reellen Input über ein Fuzzy-Regelwerk einen bestimmten Output erzeugen zu können (Abbildung 3.25).



Abbildung 3.25: Typische Fuzzy-Funktionsweise

Typische Anwendungen hierfür finden sich in der Regelungstechnik (Elektronik). Auch können Fuzzy-Regelsysteme für die Entscheidungsfindung verwendet werden. Hierbei liegt meist eine Vielzahl von oft unsicheren Input-Daten vor, die über ein festes Regelwerk ausgewertet und zu einer realen Entscheidung führen sollen.

Eine Weiterentwicklung stellen die Fuzzy-Controller dar. Bei diesen Systemen wird der Output hinsichtlich der Güte bewertet und anschließend das Fuzzy-Regelwerk solange verbessert, bis die Güte des Outputs einen gewünschten Wert erreicht.

Eine weitere Möglichkeit für den Einsatz von Fuzzy-Systemen sind sogenannte Fuzzy-Expertensysteme. Hierbei ist sowohl der Input als auch der Output für einen bestimmten Zustand bekannt. Ziel ist es nun, das Fuzzy-Regelwerk so zu erstellen, dass genau mit dem vorgegebenen Input der gewünschte Output erzielt wird. Geht man nun davon aus, dass die so erzeugten Fuzzy-Regeln auf ähnliche Situationen übertragbar sind, kann mit einem geänderten Input und den erstellten Fuzzy-Regeln ein neuer Output erzeugt werden. Diese Möglichkeit wird beispielsweise bei der Hochwasservorhersage verwendet (BÁRDOSSY 1996; PAKOSCH et al. 2008). Über gemessene Niederschlags-Abfluss-Beziehungen wird dabei ein Fuzzy-Regelwerk erstellt. Werden nun aktuelle Niederschlagsdaten in das Fuzzy-Regelwerk eingespeist, ist der Abfluss vorhersagbar. Die so erzeugten Fuzzy-Regeln sind zwar nachvollziehbar und auf Plausibilität überprüfbar, jedoch müssen sie nicht zwingend einen physikalischen Bezug aufweisen. Auf ähnliche Art und Weise werden Fuzzy-Systeme für die Datenanalyse (Mustererkennung) eingesetzt. Dadurch können beispielsweise Zuordnungen von Objekten zu Klassen hergestellt werden (TRAEGER 1994; ZIMMERMANN 1993; LIPPE 2006; MAMDANI 1974; MAMDANI 1975; SUGENO 1985).

3.4.4. Eignung von Fuzzy-Logik für das WASKlim-EUS

Prinzipiell können für Entscheidungsunterstützungssysteme verschiedene Methoden verwendet werden. Je nach Aufgabenstellung bieten sich unterschiedliche Verfahren an. Im vorliegenden Fall sollen aus möglichen Auswirkungen des Klimawandels konkrete Entscheidungen getroffen werden. Problematisch hierbei stellen sich zwei wesentliche Punkte dar. Zum einen ist dies die große Unsicherheit der heute zur Verfügung stehenden Klimaszenarien, welche nicht selten in ihrer Richtung und Ausprägung variieren. Zum anderen die große Unsicherheit über die bevorstehenden Auswirkungen. Was eine mögliche Temperaturerhöhung für beispielsweise einen Wärmekraftanlagenbetreiber bedeutet, mag zwar in der Richtung bekannt sein, jedoch ist die Ausprägung, also der Grad der Verschlechterung meist nur verbal, in Form von: „es wird schlechter“ oder gar nicht fassbar.

Der große Vorteil der Fuzzy-Logik in Bezug auf die Aufgabenstellung „Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel“ ist es, dass sowohl die große Unsicherheit der Klimaszenarien in Form von Bandbreiten berücksichtigt werden können, als auch die einfache Erstellung der Zugehörigkeitsfunktionen und des Regelwerks mit Hilfe von linguistischen Bewertungen. Inwiefern dies im Detail aussieht, wird in Kapitel 3.7 beschrieben.

3.5 Baustein: Multikriterielle Entscheidungsmodelle – AHP und NWA

Eine Entscheidung kann bzw. muss immer dann getroffen werden, wenn mehrere alternative Ziele miteinander konkurrieren, also ein Zielkonflikt vorliegt. Für jede Variante müssen dann, unter Berücksichtigung meist mehrerer Zielgrößen, die Vor- und Nachteile abgewogen werden (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991). Die Aufgabe eines multikriteriellen Entscheidungsmodells ist es, diesen Prozess zu unterstützen. Prinzipiell werden dabei Entscheidungen in Einziel- oder Mehrzielentscheidung (multikriteriell) unterteilt, ob sie unter Sicherheit oder Unsicherheit getroffen werden und ob es eine Ein- oder Mehrpersonenentscheidungen ist (SCHNEEWEIß 1991) (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Charakteristische Unterscheidungen der Entscheidungsmodelle bei Einpersonenentscheidungen (verändert nach SCHNEEWEIß 1991).

	Sicherheit	Unsicherheit
ein Ziel	Entscheidung unter Sicherheit	Entscheidung unter Ungewissheit bzw. Risiko
mehrere Ziele	Mehrzielentscheidungen unter Sicherheit	Mehrzielentscheidungen unter Ungewissheit bzw. Risiko

Bei der Entscheidung unter Sicherheit ist dem Entscheidungsträger bekannt, welche Ausprägungen die entscheidungsrelevanten Daten annehmen werden. Bei der Entscheidung unter Unsicherheit wird zusätzlich zwischen den Zuständen Ungewissheit und Risiko unterschieden. Bei Ungewissheit kann der Entscheidungsträger keine Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zustände angeben. Es kann lediglich die Angabe gemacht werden, welche Zustände generell eintreten können. Im Gegensatz dazu können unter Risiko Wahrscheinlichkeiten angegeben werden (LAUX 1998). Eine gute Übersicht über die verschiedenen Entscheidungsmodelle mit Anwendungsbeispielen ist in EISENFÜHR & WEBER (2003) zu finden.

In der Regel sind Entscheidungen mehrkriterieller Natur (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991), da im Allgemeinen mehrkriterielle Entscheidungen die Realität besser beschreiben als solche mit nur einer Zielsetzung (BAMBERG & COENENBERG 2000). Entscheidungen können nur gefällt werden, wenn Zielvorstellungen von einem Entscheidungsträger oder mehreren Entscheidungspersonen definiert werden, die einen Vergleich der Alternativen hinsichtlich ihrer Konsequenzen ermöglichen (LAUX 1998).

Die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellten Bewertungsverfahren, der Analytische-Hierarchie-Prozess (AHP) und die Nutzwertanalyse (NWA), zählen zu den mehrkriteriellen Entscheidungsmethoden unter Sicherheit.

Multi-Criteria-Probleme (bzw. **Multiple Criteria Decision Making**, kurz: MCDM) können nach HWANG & YOON (1981) in zwei Klassen eingeteilt werden, nämlich in die Klasse der Multi-Attribut-Entscheidungen (engl. „**Multi Attribute Decision Making**“, kurz MADM) und in die Klasse der Multi-Objective-Entscheidungen (engl. „**Multi Objective Decision Making**“, kurz MODM). Die beiden Klassen unterscheiden sich in der Struktur des zugrunde gelegten Multi-Criteria-Problems und durch ihre Art, das Problem zu lösen. Ein MADM-Verfahren löst das Problem durch Auswahl einer Handlungsalternative, ein MODM-Verfahren durch

Berechnung einer Alternative (DVWK 1989).

Zusätzlich werden von den klassischen MADM- und MODM-Methoden die entscheidungstechnologischen Ansätze unterschieden. Entscheidungstechnologien sind Methoden und Instrumente zur Informationsverarbeitung, mit denen der Entscheidungs- oder Problemlösungsprozess effizienter gestaltet werden kann. Effizienter bedeutet dabei, dass das Ausmaß der Zielerreichung unter Berücksichtigung des Ressourceneinsatzes gesteigert wird (POHL 1976). In Abbildung 3.26 ist eine Auswahl von MCDM-Methoden zu sehen. Eine detaillierte Übersicht über die gängigen Verfahren inklusive entsprechender Erläuterungen finden sich in DVWK (1989) oder in DIETRICH (2006).

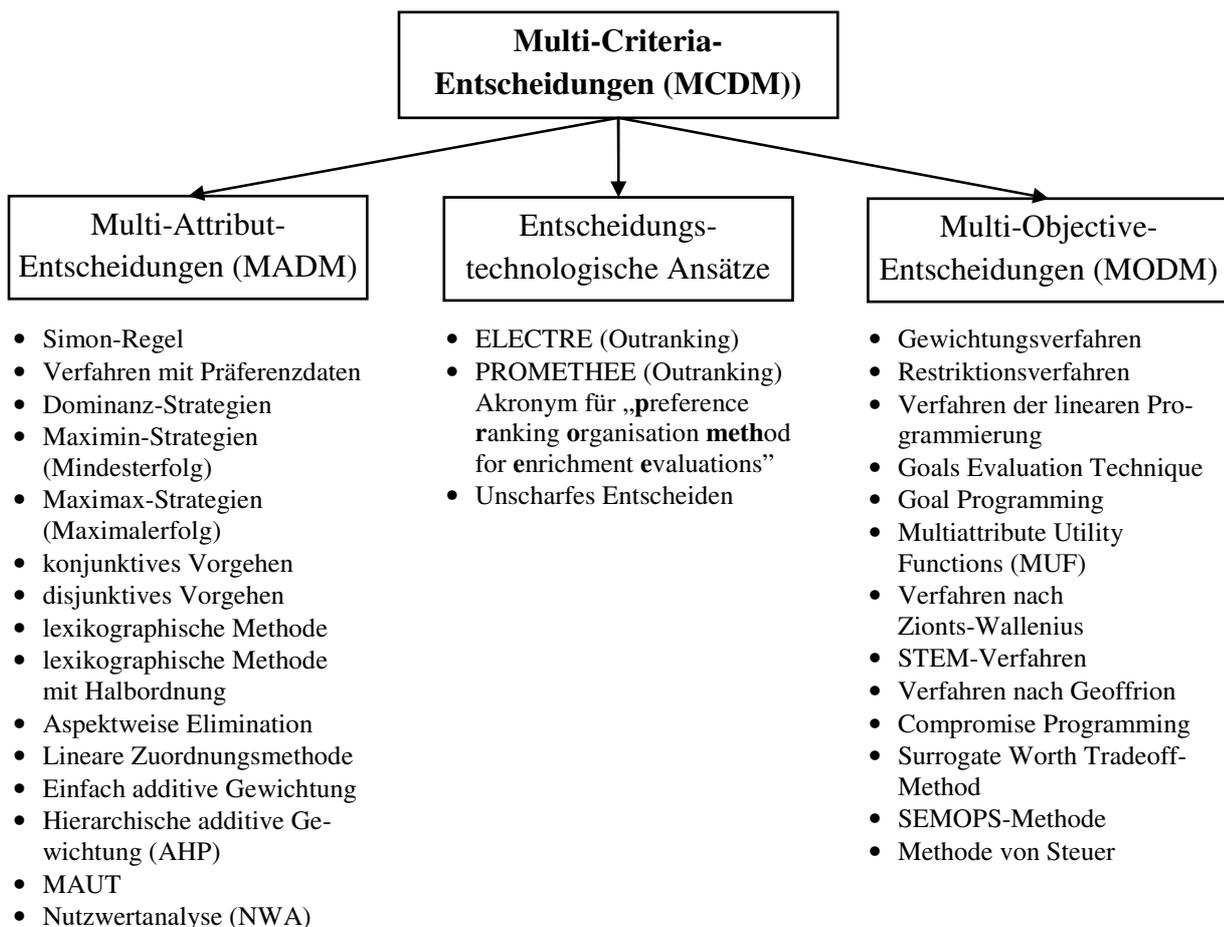


Abbildung 3.26.: Einteilung von Multi-Criteria-Entscheidungen in Anlehnung an HWANG & YOON (1981), NITZSCH (1992) und DVWK (1989)

3.5.1. Analytischer-Hierarchie-Prozess (AHP)

Der Analytische-Hierarchie-Prozess (AHP) ist ein Entscheidungsverfahren, das in den siebziger Jahren von Thomas L. Saaty entwickelt wurde und zur Lösung von mehrkriteriellen Entscheidungsproblemen dient (SAATY 1977; SAATY 1980). Prinzipiell ist das Verfahren ähnlich der Nutzwertanalyse. Die Besonderheit des AHP liegt in der Art, die Gewichtung der Bewertungskriterien zu bestimmen, die nicht wie bei der einfacheren Nutzwertanalyse frei, d.h. holistisch, vergeben, sondern über sogenannte Paarvergleiche mathematisch über den Eigenvektor der Evaluationsmatrix berechnet wird.

Hinter dem Namen „Analytischer-Hierarchie-Prozess“ verbergen sich bereits die Hauptbestandteile des Verfahrens: analytisch vorzugehen, Hierarchien aufzubauen und die Entscheidungsfindung als Prozess zu betrachten (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991; REICHARDT 2003). Analytisch bedeutet dabei, dass die Entscheidungsfindung im AHP auf mathematischen und logischen Schlüssen basiert. Hierarchisch ist das Verfahren, da das Entscheidungsproblem in mehrere Ebenen aufgeteilt und somit strukturiert wird. Als Prozess wird es bezeichnet, da Entscheidungen oft viel Zeit benötigen, um Informationen einzuholen, darüber nachzudenken und teilweise in Gruppen zu einer Meinung zu kommen (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991; OSSADNIK 1998).

Für die Anwendung des AHP müssen im Wesentlichen vier Axiome erfüllt sein, die von Saaty formuliert und später von Herker und Vargas weiter beschrieben wurden (SAATY 1986; HARKER & VARGAS 1987). Im Folgenden werden diese vereinfacht wiedergegeben (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991; REICHARDT 2003).

Axiom 1: Der Entscheidungsträger ist in der Lage, zwei beliebige Alternativen i und j aus einer endlichen Menge A sämtlicher Alternativen hinsichtlich eines Kriteriums aus der Menge C aller Kriterien zu bewerten. Die Bewertung geschieht mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs mit dem Wert $a_{i,j}$ auf Basis einer metrischen Skala. Die Skala ist reziprok, so dass gilt:

$$a_{i,j} = \frac{1}{a_{j,i}}, \quad \text{für alle } i, j \in A \quad \text{Gleich. (3.9)}$$

Das Axiom 1 besagt, dass sich der Entscheidungsträger „reziprok“ verhalten muss. Ist beispielsweise die Alternative i viermal wichtiger als die Alternative j , so ist die Alternative j lediglich $\frac{1}{4}$ so wichtig wie die Alternative i . Somit sind $\frac{1}{2} \cdot n \cdot (n-1)$ Paarvergleiche erforderlich.

Axiom 2: Beim Vergleich zweier beliebiger Alternativen $i, j \in A$ bewertet der Entscheidungsfäller niemals die eine als unendlich viel besser als die andere Alternative im Hinblick auf irgendein Kriterium aus C . Somit gilt:

$$a_{i,j} \neq \infty, \quad \text{für alle } i, j \in A \quad \text{Gleich. (3.10)}$$

Das Axiom 2 untersagt unendlich große Präferenzen. Ansonsten würde keine richtige Entscheidungssituation vorliegen. Sollte eine Alternative i unendlich viel besser sein als eine Alternative j , dann wäre automatisch die Alternative i zu bevorzugen.

Axiom 3: Das Entscheidungsproblem ist als Hierarchie darstellbar.

Das Axiom 3 setzt voraus, dass sich die Entscheidungssituation in Kriterien, Unterkriterien und Alternativen klar unterteilen lässt. Dabei muss die Bewertung einer Ebene unabhängig von der anderen sein (Abbildung 3.25).

Axiom 4: Alle relevanten Kriterien und Alternativen müssen in der Hierarchie enthalten sein.

Der Grund für das 4-te Axiom besteht darin, dass durch Hinzufügen oder Weglassen eines Kriteriums oder einer Alternative sich die Rangfolge der Alternativen ändern kann (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991; REICHARDT 2003). Das bedeutet, dass – anders als bei der Nutzwertanalyse – bei AHP nicht nachträglich eine weitere Alternative in das Bewertungsmodell eingefügt werden kann (Rank-Reversal-Effekt). Vielmehr müsste bei neu hinzukommenden Alternativen oder Kriterien der Bewertungsprozess komplett neu durchgeführt werden.

Der Analytische-Hierarchie-Prozess ist ein Entscheidungsverfahren, das zur Lösung von komplexen Fragestellungen dient. Im Folgenden wird der Ablauf des AHP näher erläutert.

Ablauf des AHP

Der Ablauf des AHP kann anhand eines Fließdiagramms, wie in Abbildung 3.28 ersichtlich, veranschaulicht werden.

Zu Beginn einer jeden Entscheidung ist ein Ziel zu formulieren (1)⁵. Ist dies geschehen, sind verschiedene Bewertungskriterien (Oberkriterien) für die Quantifizierung des Ziels zu definieren. In den meisten Fällen sind diese Bewertungskriterien noch weiter zu spezifizieren. Somit entstehen i.d.R. zu den Ober- auch Unterkriterien, welche mit den verschiedenen Alternativen zu verknüpfen sind. Das Aufstellen dieser Struktur wird als Hierarchiebildung bezeichnet und ist in Abbildung 3.27 in einem Beispiel veranschaulicht (2).

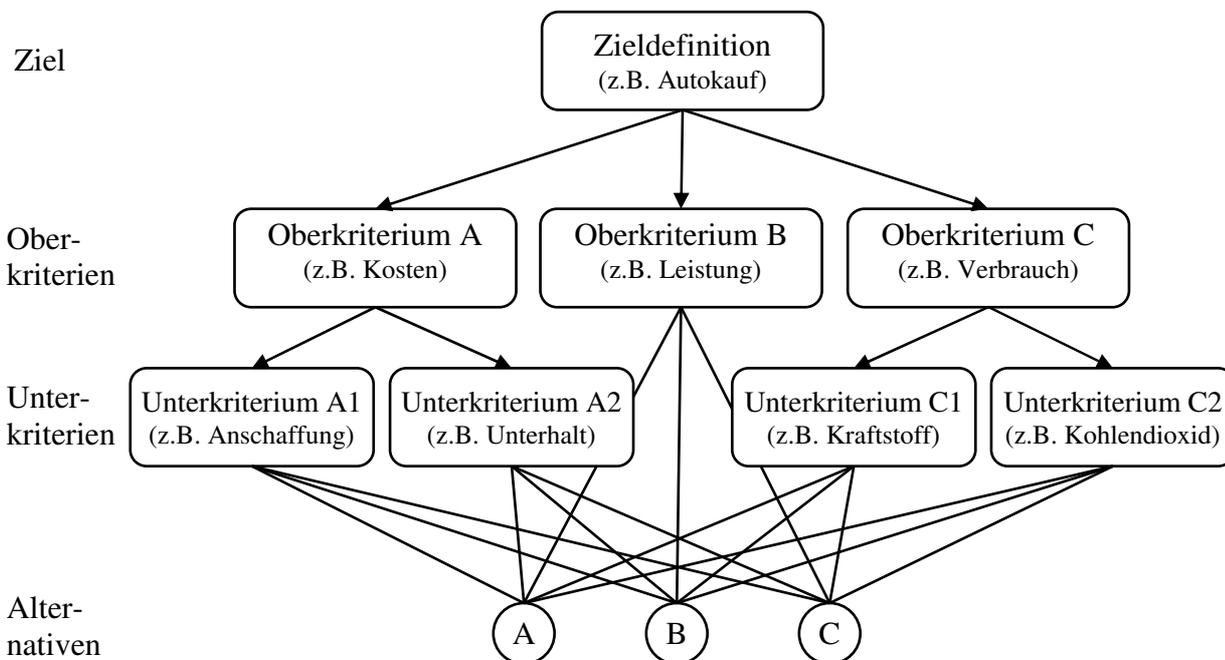


Abbildung 3.27: Hierarchiebildung im AHP

⁵ Die Zahlen in runder Klammer beziehen sich auf die Zahlen in Abbildung 3.28.

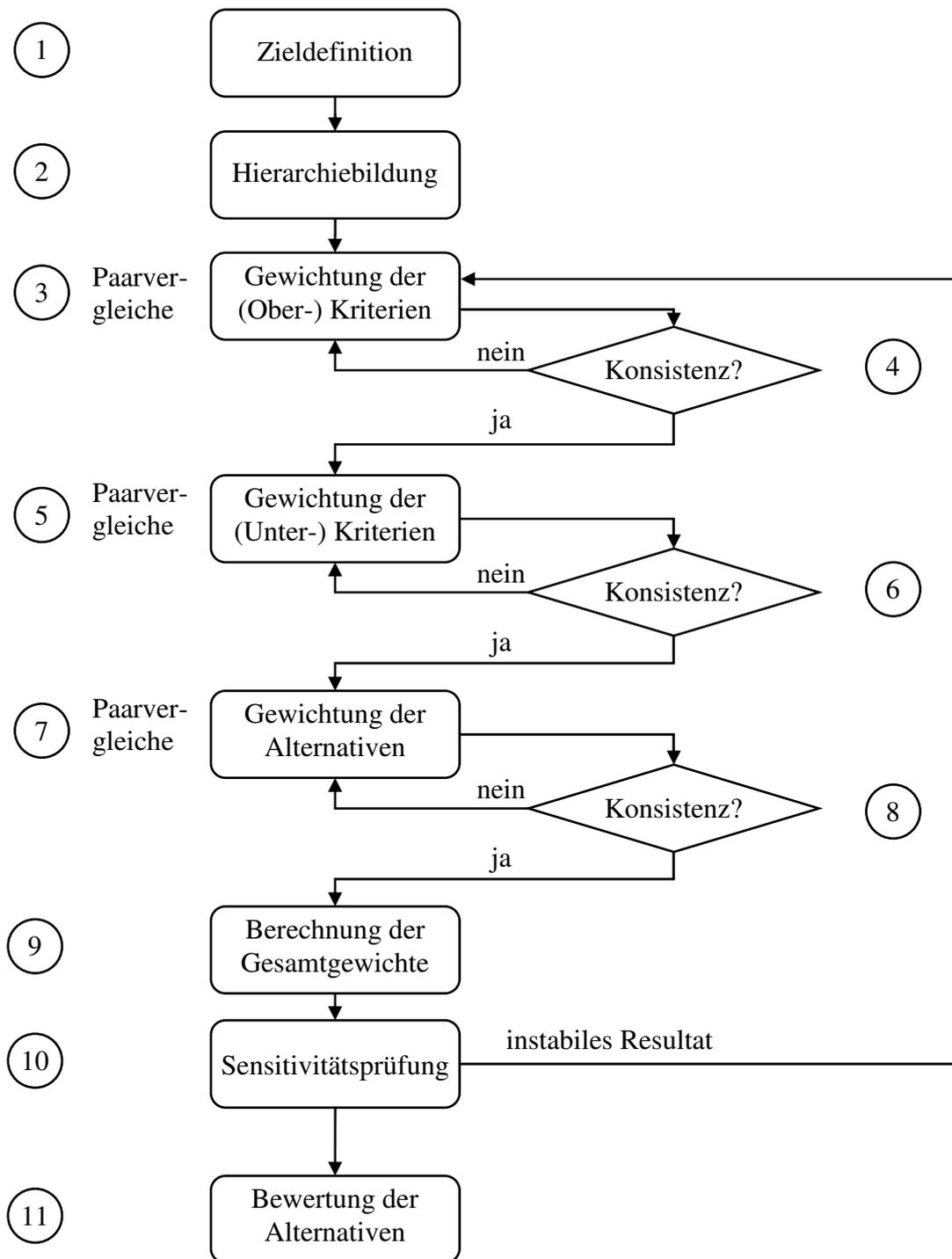


Abbildung 3.28: Fließdiagramm zum AHP (in Anlehnung an REICHARDT 2003; MEIXNER & HAAS 2002)

Nach der Hierarchiebildung erfolgt die Gewichtung der Ober- und Unterkriterien (3) (5). Die mit Hilfe von Paarvergleichen errechneten Gewichtungen sind auf ihre Konsistenz zu überprüfen (4) (6). Wird diese nicht bestätigt, sind die Bewertungen der Paarvergleiche zu überdenken. Liegt Konsistenz vor, werden als nächstes die Alternativen hinsichtlich jedes Kriteri-

ums verglichen (Paarvergleiche) und die Gewichtungen berechnet (7). Hier sind ebenfalls die Konsistenzen zu überprüfen (8). Liegt auch hier Konsistenz vor, kann die Berechnung der Gesamtgewichte erfolgen (9) und bei Bedarf eine Sensitivitätsprüfung durchgeführt werden (10). Abschließend erfolgt die Bewertung der Alternativen (11).

Im Folgenden werden die Schritte der Kriteriengewichtung, welche auch als Prioritätenberechnung bezeichnet werden, und die Konsistenzprüfung näher erläutert, da sie den Kern des Analytischen-Hierarchie-Prozesses bilden.

Berechnung der Einzelgewichtungen

Da beim AHP neben quantitativen auch qualitative Informationen verarbeitet werden können, ist für die Prioritätenberechnung eine Bewertungsskala (Intervallskala) erforderlich (LUSTI 2002). Saaty empfiehlt für die Wertung der Priorität eines Elements im Vergleich zu einem anderen (Paarvergleich) eine 9-Punkte Skala, wie sie in Tabelle 3.6 abgebildet ist (SAATY 1980). Die Skalenwerte a_{ij} sind als Verhältniswerte zu betrachten, wobei die Zahl 1 den natürlichen Nullpunkt darstellt (MEIXNER & HAAS 2002). Die Beziehung der Skalenwerte, d.h. also die Wichtigkeit w des i -ten Elements gegenüber dem j -ten Element, gestaltet sich wie folgt (Gleich. (3.11); Tabelle 3.6):

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad \text{Gleich. (3.11)}$$

mit:

a_{ij} = Verhältniswert des i -ten zum j -ten Element

w_i = Wichtigkeit des i -ten Elements

w_j = Wichtigkeit des j -ten Elements

Tabelle 3.6: 9-Punkte Bewertungsskala (Intervallskala) nach Saaty für die Paarvergleiche (HAEDRICH et al. 1986)

Skalenwerte	Umschreibung	Interpretation
1	gleiche Bedeutung	beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächst höhere Element
3	etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	erheblich größere Bedeutung	Erfahrung u. Einschätzung sprechen f. eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen
7	sehr viel größere Bedeutung	die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	absolut dominierend	es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen
2, 4, 6, 8	Zwischenstufen	

Für die reziproken Werte gelten entsprechende Skalenwerte (Tabelle 3.7):

Tabelle 3.7: Umgekehrte Relation der Bewertungsskala (MEIXNER & HAAS 2002)

Skalenwert	Umschreibung
1	gleiche Bedeutung
1/3	etwas geringere Bedeutung
1/5	erheblich geringere Bedeutung
1/7	sehr viel geringere Bedeutung
1/9	absolut unterlegen
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Zwischenwerte

In der Literatur werden auch andere Skalen, unter Einhaltung der Grenzen 1 und 9, diskutiert. Beispielsweise seien an dieser Stelle zwei mögliche Variationen gezeigt (Tabelle 3.8). Abbildung 3.29 zeigt, dass bei den zwei alternativen Skalen der Anstieg gegenüber der Saaty-Skala relativ langsam erfolgt. Praktische Untersuchungen von HARKER & VERGAS (1987) zeigen jedoch, dass diese Skalen nahezu gleiche Ergebnisse wie die Saaty-Skala liefern.

Tabelle 3.8: AHP-Gewichtung, Alternativskalen (WEBER 1993)

Klasse	Umschreibung	Skalenbezeichnung	
		(10/10 – 18/2)	(9/9 – 9/1)
1	gleich	10/10	9/9
3	etwas größer	12/8	9/7
5	wesentlich größer	14/6	9/5
7	viel größer	16/4	9/3
9	sehr viel größer	18/2	9/1

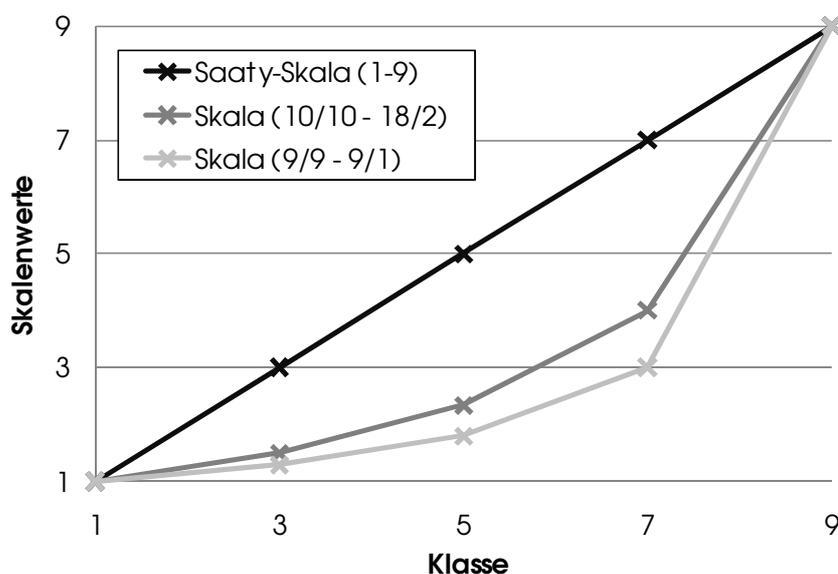


Abbildung 3.29: Vergleich verschiedener Bewertungsskalen (in Anlehnung an WEBER 1993)

Nach Festlegung der Bewertungsskala erfolgen die Paarvergleiche. Dabei werden jeweils zwei Kriterien miteinander verglichen. Durch das 1. Axiom ergeben sich für jede Kriterien- oder Alternativenbewertung $1/2 \cdot n \cdot (n-1)$ Paarvergleiche, die in einer sogenannten Evaluationsmatrix zusammengestellt werden (Abbildung 3.30).

$$E = \begin{bmatrix} 1 & a_{1,2} & a_{1,3} & \dots & a_{1,j} \\ a_{2,1} & 1 & & & \\ a_{3,1} & & 1 & & \\ \vdots & & & 1 & \\ a_{j,i} & & & & 1 \end{bmatrix} \quad \text{für alle } i, j \in N \quad \text{Gleich. (3.12)}$$

Abbildung 3.30: Evaluationsmatrix E (in Anlehnung an MEIXNER & HAAS 2002; REICHARDT 2003)

Für das Beispiel „Autokauf“ (Abbildung 3.27) könnte die Evaluationsmatrix der Ober- und Unterkriterien folgendermaßen aussehen (Tabelle 3.9):

Tabelle 3.9: Evaluationsmatrix der Ober- und Unterkriterien für das Beispiel „Autokauf“

Oberkriterien	Kosten	Leistung	Verbrauch
Kosten	1	5	3
Leistung	1/5	1	1/3
Verbrauch	1/3	3	1

Beispielsweise bedeutet die Zahl „5“ bei „Kosten“ und „Leistung“, dass das Oberkriterium „Kosten“ eine „erheblich wichtigere Bedeutung“ hat als das Oberkriterium „Leistung“. Im Gegensatz dazu steht bei „Leistung“ und „Kosten“ die Zahl „1/5“, welche den reziproken Wert darstellt.

Nachdem die Evaluationsmatrix vollständig bewertet ist, erfolgt die Berechnung der Einzelgewichte der Oberkriterien. Diese werden nach Saaty mit Hilfe des Eigenvektors der Evaluationsmatrix bestimmt. Für den Eigenvektor \vec{w} gilt allgemein (WEBER 1993):

$$E \vec{w} = \lambda_i \vec{w} \quad \text{Gleich. (3.13)}$$

mit:

\vec{w} = Eigenvektor

E = Evaluationsmatrix

λ_i = Eigenwerte

Die Multiplikation des Eigenvektors mit der (Evaluations-) Matrix führt somit zum gleichen Ergebnis, wie die Multiplikation der Eigenwerte mit dieser. Wird der Ansatz umgestellt, so erhält man folgendes homogenes lineares Gleichungssystem:

$$(E - \lambda_i I) \vec{w} = 0 \quad \text{Gleich. (3.14)}$$

mit:

$I =$ Einheitsmatrix

Da $\vec{w} \neq 0$ vorausgesetzt wird, ist das System genau dann lösbar, wenn gilt:

$$\det(E - \lambda_i I) = 0 \quad \text{Gleich. (3.15)}$$

mit:

$\det()$ = Determinante

Diese Determinante ist ein Polynom n-ten Grades vom Typ:

$$\det(E - \lambda_i I) = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \cdots & a_{1,j} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \cdots & a_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \cdots & a_{i,j} - \lambda \end{vmatrix} = P_n(\lambda) \quad \text{Gleich. (3.16)}$$

Seine Nullstellen sind die gesuchten Eigenwerte. Das Polynom $P_n(\lambda)$ nennt man charakteristisches Polynom und kann auch folgendermaßen dargestellt werden:

$$|E - \lambda_i I| = 0 \quad \text{Gleich. (3.17)}$$

Da ein Polynom n-ten Grades n-Lösungen aufweist, existieren i.d.R. mehrere Eigenwerte. Im Rahmen der AHP-Methode werden die Eigenvektoren, welche im AHP noch zu normieren sind, als Attributgewichte (Kriteriengewichte) interpretiert. Mit Hilfe des mittleren maximalen Eigenwerts der Matrix E, welcher als λ_{\max} bezeichnet wird, kann die Konsistenzprüfung des AHP bestimmt werden. Dies ist möglich, da bei dieser besonderen Form der Evaluationsmatrix ($a_{i,j} = w_i/w_j$ und $w_{j,i} = 1/w_{i,j}$) bei einer konsistenten Bewertung $\lambda_i = n$ gilt. Bei einer auch nur teilweisen inkonsistenten Bewertung gilt dieser Zusammenhang nicht mehr ($\lambda_i \neq n$). Der Grad der Abweichung des mittleren maximalen Eigenwertes von n gibt das Maß der Inkonsistenz an. Beides wird im Folgenden näher erläutert.

Beispiel:

Gegeben sei eine Matrix E:

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

Daraus lassen sich die Eigenwerte und der Eigenvektor bestimmen:

$$\begin{aligned}\det(E - \lambda_1 I) &= \begin{vmatrix} 1 - \lambda & 5 \\ 1/5 & 1 - \lambda \end{vmatrix} \\ &= (1 - \lambda) \cdot (1 - \lambda) - 1/5 \cdot 5 \\ &= \lambda^2 - 2 \cdot \lambda\end{aligned}$$

Die Lösung der Gleichung $\lambda^2 - 2 \cdot \lambda = 0$ betragen $\lambda_1 = 2$ und $\lambda_2 = 0$ (trivial). Diese λ -Werte stellen die Eigenwerte der Matrix E dar.

Ausgehend von dem Ansatz $E\vec{w} = \lambda_1 \vec{w}$ folgt:

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$$

Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned}1 \cdot w_1 + 5 \cdot w_2 &= \lambda \cdot w_1 \\ 1/5 \cdot w_1 + 1 \cdot w_2 &= \lambda \cdot w_2\end{aligned}$$

oder:

$$\begin{aligned}(1 - \lambda) \cdot w_1 + 5 \cdot w_2 &= 0 \\ 1/5 \cdot w_1 + (1 - \lambda) \cdot w_2 &= 0\end{aligned}$$

aus der ersten Gleichung ergibt sich:

$$w_1 = -5 \cdot w_2 / (1 - \lambda)$$

mit einem frei gewählten Wert von $w_2 = 1$ und dem Eigenwert $\lambda_1 = 2$ folgt:

$$w_1 = -5 / (1 - 2) = 5; \quad w_2 = 1$$

$$\vec{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Der Vektor \vec{w} stellt den Eigenvektor der Matrix E dar. Die AHP-Methode verwendet jedoch den normierten Eigenvektor für die Berechnung der Einzelgewichte. Dieser wird berechnet, indem die Einzelkomponenten durch die Summe der Komponenten dividiert werden:

$$\vec{w} = \begin{bmatrix} 5/6 \\ 1/6 \end{bmatrix} \quad (\text{normierter Eigenvektor})$$

Dieser normierte Vektor \vec{w} stellt die Attribut- bzw. Kriteriengewichte der Evaluationsmatrix dar. Der AHP verwendet für die Berechnung der Eigenvektoren und -werte ein einfaches Standardverfahren. Dieses läuft in 4 Schritten ab (Tabelle 3.10):

1. Übernahme von $1/2 \cdot n \cdot (n-1)$ direkt festgelegten Kriterienvergleichswerten a_{ij} in der Evaluationsmatrix.
2. Ergänzung der Evaluationsmatrix durch die reziproken Vergleichswerte $(1/a_{ij})$.
3. Spaltenweise Addition (c_j) aller Vergleichswerte mit anschließender Normierung.
4. Zeilenweise Addition (r_i) der so aufbereiteten Vergleichsergebnisse mit anschließender Normierung (w_i).

Die berechneten Spaltenwerte w_i stellen den Eigenvektor und somit die Kriteriengewichtung dar.

Tabelle 3.10: Gewichtungsberechnung der AHP-Methode (Eigenvektorverfahren)

	Evaluationsmatrix E (Bewertungsmatrix)				Evaluationsmatrix normiert				Eigenvektor EV (Zeilensumme)	EV normiert (Gewicht)
	a_1	a_2	...	a_n	a_1	a_2	...	a_n	r_i	w_i
a_1	$a_{11} = 1$	a_{12}	...	a_{1n}	a_{11}/c_1	a_{12}/c_2	...	a_{1n}/c_n	$r_1 = \sum_{j=1}^n (a_{1j}/c_j)$	$w_1 = r_1/n$
a_2	$a_{21} = 1/a_{12}$	1	...	a_{2n}	a_{21}/c_1	a_{22}/c_2	...	a_{2n}/c_n	$r_2 = \sum_{j=1}^n (a_{2j}/c_j)$	$w_2 = r_2/n$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
a_n	$a_{n1} = 1/a_{1n}$	a_{2n}	...	$a_{nn} = 1$	a_{n1}/c_1	a_{n2}/c_2	...	a_{nn}/c_n	r_n	$w_n = r_n/n$
c_j	$c_1 = \sum_{i=1}^n a_{i1}$	$c_2 = \sum_{i=1}^n a_{i2}$	...	c_n	1	1	...	1	n	1

Beispiel:

Tabelle 3.11: Berechnung der Gewichte nach dem Standardverfahren des AHP

	Evaluationsmatrix		Normierung		Zeilensumme	Gewicht
	a_1	a_2	a_1	a_2	r_1	w_1
a_1	1	5	$\frac{1}{6/5} = 5/6$	$\frac{5}{6}$	$10/6 = 5/3$	$\frac{5/3}{2} = 5/6$
a_2	1/5	1	$\frac{1/5}{6/5} = 1/6$	$\frac{1}{6}$	$2/6 = 1/3$	$\frac{1/3}{2} = 1/6$
c_i	6/5	6	1	1	$6/3 = 2$	1

Die Berechnung der Kriteriengewichte, $5/6$ und $1/6$, nach dem Standardverfahren des AHP entspricht dem Eigenvektor aus obigem Beispiel. Das Standardverfahren des AHP liefert jedoch lediglich bei annähernd konsistenten Paarvergleichen exakte Ergebnisse. Bei geringer Inkonsistenz $]0; 0,1[$ ⁶ wird die Gewichtung ungenau. Das Ergebnis kann jedoch durch die sogenannte Potenzmethode verbessert werden (LUSTI 2002). Dabei wird die Evaluationsmatrix quadriert, anschließend, wie beim Standardverfahren, normalisiert, die Zeilensummen gebildet und die Gewichte bzw. der Eigenvektor erneut ausgerechnet. Die Differenz der Gewichte aus dem Standardverfahren zu der ersten Potenzierung sollte möglichst gering sein. Überschreitet es ein bestimmtes Maß ist die quadrierte Evaluationsmatrix nochmals zu quadrieren und das gleiche Prozedere erneut durchzuführen. Dies ist solange zu wiederholen, bis die Differenz der Gewichte der letzten zur vorletzten quadrierten Matrix gegen null tendiert ($< 1\%$). In der Regel wird dies spätestens nach dreimaligem quadrieren erreicht. Sollte ein Konsistenzwert von $> 0,1$ vorliegen, sind die getroffenen Paarvergleiche inkonsistent und die Bewertung sollte nochmals überdacht werden.

Fortführung des Beispiels aus Tabelle 3.9.:

Tabelle 3.12: Evaluationsmatrix (EV0)

	Evaluationsmatrix			Normierung			Zeilen- summe r_i	Ge- wichte EV0 w_i
	Kosten	Leistung	Ver- brauch	Kosten	Leistung	Ver- brauch		
Kosten	1	5	3	0,65	0,56	0,69	1,900	0,633
Leistung	1/5	1	1/3	0,13	0,11	0,08	0,318	0,106
Verbrauch	1/3	3	1	0,22	0,33	0,23	0,781	0,260
	1,53	9,00	4,33	1,00	1,00	1,00	3,000	1,000

Tabelle 3.13: Quadrierte Evaluationsmatrix (EV1⁷)

	Evaluationsmatrix (quadriert)			Normierung			Zeilen- summe r_i	Ge- wichte EV1 w_i
	Kosten	Leistung	Ver- brauch	Kosten	Leistung	Ver- brauch		
Kosten	3,00	19,00	7,67	0,63	0,64	0,64	1,911	0,637
Leistung	0,51	3,00	1,27	0,11	0,10	0,11	0,314	0,105
Verbrauch	1,27	7,67	3,00	0,26	0,26	0,25	0,775	0,258
	4,78	29,67	11,93	1,00	1,00	1,00	3,000	1,000

⁶ Die Konsistenzprüfung wird im folgenden Unterkapitel näher erläutert.

⁷ Die Zahl nach ‚EV‘ gibt an, wie oft die Evaluationsmatrix, für die Berechnung der Endgewichte, quadriert wurde.

Tabelle 3.14: Differenz der Gewichte von EV1 zu EV0

	Gewichte EV0	Gewichte EV1	Differenz |EV1-EV0|
Kosten	0,633	0,637	0,004
Leistung	0,106	0,105	0,001
Verbrauch	0,260	0,258	0,002
	1,000	1,000	

Da der Betrag der Differenzen von $|EV1-EV0| > 1\%$ ist, ist die Evaluationsmatrix (EV1) erneut zu quadrieren und die Gewichte zu berechnen.

Tabelle 3.15: Erneut quadrierte Evaluationsmatrix (EV2)

	Evaluationsmatrix (erneut quadriert)			Normierung			Zeilen- summe r_i	Ge- wichte EV2 w_i
	Kosten	Leistung	Ver- brauch	Kosten	Leistung	Ver- brauch		
Kosten	28,42	172,78	70,07	0,64	0,64	0,64	1,911	0,637
Leistung	4,67	28,42	11,52	0,10	0,10	0,10	0,314	0,105
Verbrauch	11,52	70,07	28,42	0,26	0,26	0,26	0,775	0,258
	44,61	271,27	110,01	1,00	1,00	1,00	3,000	1,000

Tabelle 3.16: Differenz der Gewichte von EV2 zu EV1

	Gewichte EV1 w_i	Gewichte EV2 w_i	Differenz |EV2-EV1|
Kosten	0,637	0,637	0,000
Leistung	0,105	0,105	0,000
Verbrauch	0,258	0,258	0,000
	1,000	1,000	

Nach zweimaligem Quadrieren beträgt die Differenz der Gewichte von EV2 zu EV1 einen Wert kleiner 1% (Tabelle 3.16). Somit kann das Potenzverfahren abgebrochen werden und die Endgewichte stehen fest. Das Kriterium „Kosten“ erhält somit die höchste Gewichtung mit $63,7\%$, gefolgt von dem Kriterium „Verbrauch“ mit $25,8\%$ und dem Kriterium „Leistung“ mit $10,5\%$.

Konsistenzprüfung

Bei der Bearbeitung der Evaluationsmatrix ist besonderes Augenmerk auf die Konsistenz der Bewertungen zu legen. Ist beispielsweise das Kriterium A „sehr viel wichtiger“ als das Kriterium B und das Kriterium A lediglich „wichtiger“ als das Kriterium C, so muss das Kriterium B „unwichtiger“ als Kriterium C sein, ansonsten ist die Bewertung unlogisch, sprich inkonsistent (Transitivität). Eine absolut konsistente Bewertung ist jedoch nur bei einem vollständig rationalen Verhalten des Entscheidungsträgers, bei einer (2, 2)-Matrix oder bei Verwendung von quantitativen Daten möglich (WEBER 1993; ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991). Bei realen Entscheidungsträgern ist die Bewertung i.d.R. zumindest teilweise inkonsistent. Ursachen für Inkonsistenz liegen jedoch nicht nur beim Entscheidungsträger, sondern auch an der neunstufigen Bewertungsskala. Beispielsweise müsste für die Paarvergleiche $a_{12} = 5$ und $a_{23} = 2$ der Paarvergleich $a_{13} = 10$ sein, was aber mit einer 9-Punkte Skala nicht zulässig ist.

Für die Prüfung der Konsistenz wurde von Saaty ein Verfahren entwickelt, das die Stimmigkeit der Einzelbewertungen untereinander angibt. Dazu ist ein Konsistenzindex CI und eine Konsistenzrate CR zu ermitteln. Der Wert CR gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass die Bewertungsmatrix mit Zufallszahlen erstellt wurde. Dabei werden Konsistenzwerte von unter 10 % als akzeptabel angesehen (MEIXNER & HAAS 2002; LINGNAU et al. 2007; HARKER 1989; NOBLE 1990; SAATY 1996; ROMMELFANGER & EICKEMEIER 2002).

Für die Ermittlung des Konsistenzindex CI, welcher für die Bestimmung von CR benötigt wird, ist die Berechnung einer sogenannten „Durchschnittsmatrix“ erforderlich. Die Berechnung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 3.17. Dabei stellen die Indizes w_i die Gewichte und a_{ij} die Skalenwerte (Paarvergleiche) der Evaluationsmatrix dar (Tabelle 3.10). Mit Hilfe der „Durchschnittsmatrix“ werden gewichtete Zeilensummen \bar{r}_i berechnet. Werden diese durch die Einzelgewichte w_i geteilt, erhält man zudem die Eigenwerte λ_i der Evaluationsmatrix (Gleich. (3.13)).

Tabelle 3.17: Berechnung der „Durchschnittsmatrix“ und der Eigenwerte λ_i (REICHARDT 2003; MEIXNER & HAAS 2002)

	a_1	a_2	...	a_n	\bar{r}_i	λ_i
a_1	$w_1 \cdot a_{11}$	$w_2 \cdot a_{12}$	...	$w_n \cdot a_{1n}$	$\bar{r}_1 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot a_{1i}$	$\lambda_1 = \frac{\bar{r}_1}{w_1}$
a_2	$w_1 \cdot a_{21}$	$w_2 \cdot a_{22}$	...	$w_n \cdot a_{2n}$	$\bar{r}_2 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot a_{2i}$	$\lambda_2 = \frac{\bar{r}_2}{w_2}$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots	\vdots	\vdots
a_n	$w_1 \cdot a_{n1}$	$w_2 \cdot a_{n2}$	...	$w_n \cdot a_{nn}$	\bar{r}_n	$\lambda_n = \frac{\bar{r}_n}{w_n}$

Für die Berechnung des maximalen Eigenwertes der Evaluationsmatrix, der für die Ermittlung der Konsistenz erforderlich ist, ist die Summe der Eigenwerte λ_i durch die Anzahl an Kriterien zu dividieren (Gleich. (3.18)).

Maximaler Eigenwert λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad \text{Gleich. (3.18)}$$

mit:

λ_i = Eigenwerte i

n = Anzahl der Kriterien

Liegt eine konsistente Entscheidung vor, entspricht der maximale Eigenwert λ_{\max} der Anzahl n der Kriterien. Die Differenz beider Größen ist ein Maß für den Grad der Inkonsistenz. Mit zunehmender Inkonsistenz steigt der maximale Eigenwert ($\lambda_{\max} > n$). Der Konsistenzindex CI ist folgendermaßen zu berechnen.

Konsistenzindex CI

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad \text{Gleich. (3.19)}$$

mit:

λ_{\max} = maximaler Eigenwert

n = Anzahl der Kriterien

Das Verhältnis von Konsistenzindex CI zu einem sogenannten Random Index (R) (Tabelle 3.18) oder auch Zufallsindex oder Zufallskonsistenz genannt, wird als Konsistenzratio oder Konsistenzverhältnis (CR) bezeichnet und gibt das Maß der Inkonsistenz an. Der Random Index ist ein Durchschnittswert, der aus zufällig zustande gekommener, gleich großer Matrizen errechnet wurde (MEIXNER & HAAS 2002).

Tabelle 3.18: Mögliche Random Indizes (R)

Anzahl der Kriterien	nach HARKER (1989) und Saaty (1983)	nach Donegan/Dodd (aus WEBER 1993)
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,58	0,49
4	0,90	0,80
5	1,12	1,06
6	1,24	1,18
7	1,32	1,25
8	1,41	1,32
9	1,45	1,37
10	1,49	1,41

Konsistenzratio CR

$$CR = CI/R \quad \text{Gleich. (3.20)}$$

mit:

CI = Konsistenzindex

R = Random Index

Liegt der CR-Wert nach Gleich. (3.20) über 10 %, so sollte der Entscheidungsträger die Bewertung der Kriterien überdenken (SAATY 1982).

Beispiel (Fortführung des Beispiels aus Tabelle 3.12ff):

Tabelle 3.19: Evaluationsmatrix (EV0)

	Evaluationsmatrix			Normierung			EV0			
	Kosten	Leistung	Verbrauch	Kosten	Leistung	Verbrauch	r_i	w_i	\bar{r}_i	λ_i
Kosten	1	5	3	0,65	0,56	0,69	1,900	0,633	1,946	3,072
Leistung	1/5	1	1/3	0,13	0,11	0,08	0,318	0,106	0,320	3,011
Verbrauch	1/3	3	1	0,22	0,33	0,23	0,781	0,260	0,790	3,033
	1,53	9,00	4,33	1,00	1,00	1,00	3,000	1,000	$\Sigma=9,116$	

Berechnung des maximalen Eigenwertes λ_{\max} nach Gleich. (3.18):

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} = \frac{9,116}{3} = 3,039$$

Berechnung des Konsistenzindex CI nach Gleich. (3.19):

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} = \frac{(3,039 - 3)}{(3 - 1)} = 0,019$$

Berechnung des Konsistenzratios CR nach Gleich. (3.20):

$$CR = \frac{CI}{R} = \frac{0,019}{0,58} = 0,033 < 0,1$$

Der CR-Wert von 0,033 ist kleiner als 0,1 und somit als konsistent zu betrachten.

3.5.2. Beispiel AHP „Autokauf“

Anhand eines Beispiels aus Tabelle 3.12ff wird nun aufgezeigt, wie aus der Berechnung der Einzelgewichte die Gesamtbewertung einer multikriteriellen Entscheidung berechnet wird (Abbildung 3.31).

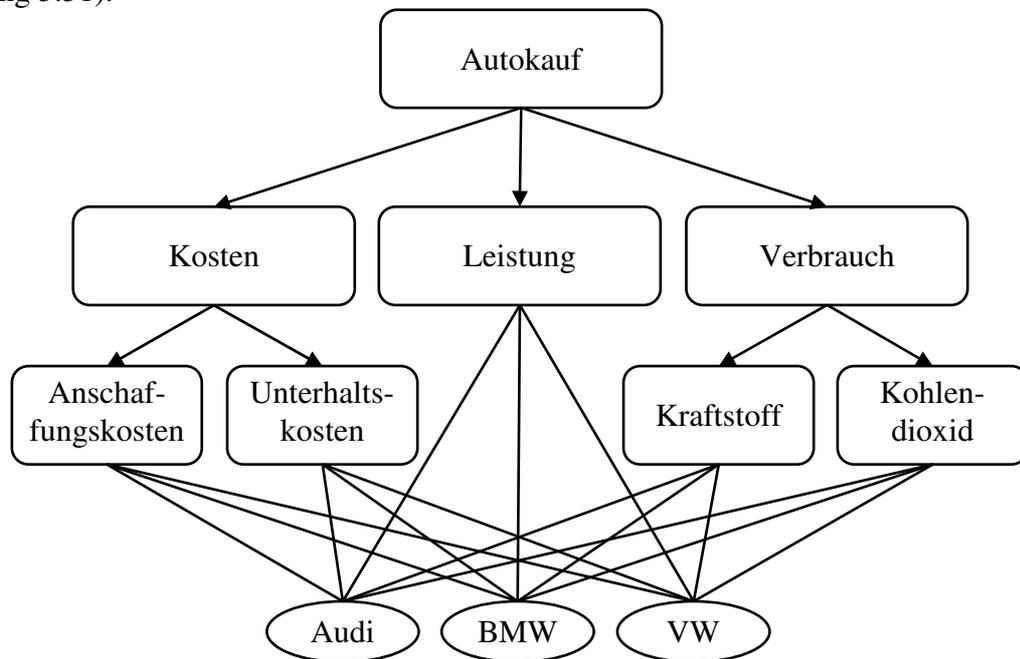


Abbildung 3.31: Hierarchiebildung im AHP am Beispiel „Autokauf“

Tabelle 3.20: Evaluationsmatrix Oberkriterien (EV2)

Oberkriterien	K	L	V	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{max}	CI	CR
Kosten K	1	5	3	0,637	1,946	3,072			
Leistung L	1/5	1	1/3	0,105	0,320	3,011			
Verbrauch V	1/3	3	1	0,258	0,790	3,033			
	1,53	9,00	4,33	1,000		$\Sigma = 9,116$	3,039	0,019	0,033

Tabelle 3.21: Evaluationsmatrix Unterkriterien – Kosten (EV0)

Unterkriterien - Kosten	AK	UK	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{max}	CI	CR
Anschaffungskosten AK	1	5	0,833	1,667	2,000			
Unterhaltskosten UK	1/5	1	0,167	0,333	2,000			
	1,2	6,00	1,000		$\Sigma = 4,000$	2,000	0,000	0,000

Tabelle 3.22: Evaluationsmatrix Unterkriterien – Verbrauch (EV0)

Unterkriterien - Verbrauch	KV	CV	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{max}	CI	CR
Kraftstoff KV	1	9	0,900	1,800	2,000			
Kohlendioxid CV	1/9	1	0,100	0,200	2,000			
	1,11	10,00	1,000		$\Sigma = 4,000$	2,000	0,000	0,000

Tabelle 3.23: Quantitative Bewertung der Alternativen

Alternativen	Anschaffungs- kosten AK [€]	Unterhalts- kosten UK [€/a]	Leistung L [PS]	Kraftstoff KV [l/100km]	Kohlendioxid CV [g/km]
Audi	30.000	600	130	7,5	140
BMW	35.000	550	150	8,0	150
VW	25.000	450	110	7,0	130

Tabelle 3.24: Evaluationsmatrix Alternativen – Anschaffungskosten (EV0)

Anschaffungskosten	Audi	BMW	VW	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{\max}	CI	CR
Audi	1	1,17	0,83	0,327	0,981	3,000			
BMW	0,86	1	0,71	0,280	0,841	3,000			
VW	1,20	1,40	1	0,393	1,178	3,000			
	3,06	3,57	2,55	1,000	$\Sigma = 9,000$	3,000	0,000	0,000	

Tabelle 3.25: Evaluationsmatrix Alternativen – Unterhaltskosten (EV0)

Unterhaltskosten	Audi	BMW	VW	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{\max}	CI	CR
Audi	1	0,92	0,75	0,292	0,876	3,000			
BMW	1,09	1	0,82	0,319	0,956	3,000			
VW	1,33	1,22	1	0,389	1,168	3,000			
	3,42	3,14	2,57	1,000	$\Sigma = 9,000$	3,000	0,000	0,000	

Tabelle 3.26: Evaluationsmatrix Alternativen – Leistung (EV0)

Leistung	Audi	BMW	VW	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{\max}	CI	CR
Audi	1	0,87	1,18	0,333	1,000	3,000			
BMW	1,15	1	1,36	0,385	1,154	3,000			
VW	0,85	0,73	1	0,282	0,846	3,000			
	3,00	2,60	3,55	1,000	$\Sigma = 9,000$	3,000	0,000	0,000	

Tabelle 3.27: Evaluationsmatrix Alternativen – Kraftstoff (EV0)

Kraftstoff	Audi	BMW	VW	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{\max}	CI	CR
Audi	1	1,07	0,93	0,332	0,997	3,000			
BMW	0,94	1	0,88	0,312	0,935	3,000			
VW	1,07	1,14	1	0,356	1,068	3,000			
	3,01	3,21	2,81	1,000	$\Sigma = 9,000$	3,000	0,000	0,000	

Tabelle 3.28: Evaluationsmatrix Alternativen – Kohlendioxid (EV0)

Kohlendioxid	Audi	BMW	VW	w_i	\bar{r}_i	λ_i	λ_{\max}	CI	CR
Audi	1	1,07	0,93	0,332	0,997	3,000			
BMW	0,93	1	0,87	0,310	0,930	3,000			
VW	1,08	1,15	1	0,358	1,073	3,000			
	3,01	3,23	2,80	1,000	$\Sigma=9,000$	3,000	3,000	0,000	-

Tabelle 3.29: Übersicht über die Kriterien- und Alternativengewichtungen

Oberkriterien	Kosten 63,7 %		Leistung 10,5 %	Verbrauch 25,8 %	
Unterkriterien	Anschaffungs- kosten 83,3 %	Unterhalts- kosten 16,7 %	-	Kraftstoff 90,0 %	Kohlen- dioxid 10,0 %
Audi	32,7 %	29,2 %	33,3 %	33,2 %	33,2 %
BMW	28,0 %	31,9 %	38,5 %	31,2 %	31,0 %
VW	39,3 %	38,9 %	28,2 %	35,6 %	35,8 %

Ausmultiplikation der Kriterien- und Alternativengewichtungen:

Alternative „Audi“

$$= ((0,327 \cdot 0,833 + 0,292 \cdot 0,167) \cdot 0,637) + (0,333 \cdot 0,105) + ((0,332 \cdot 0,900 + 0,332 \cdot 0,100) \cdot 0,258)$$

$$= 0,325 \rightarrow 32,5\%$$

Alternative „BMW“

$$= ((0,280 \cdot 0,833 + 0,319 \cdot 0,167) \cdot 0,637) + (0,385 \cdot 0,105) + ((0,312 \cdot 0,900 + 0,310 \cdot 0,100) \cdot 0,258)$$

$$= 0,303 \rightarrow 30,3\%$$

Alternative „VW“

$$= ((0,393 \cdot 0,833 + 0,389 \cdot 0,167) \cdot 0,637) + (0,282 \cdot 0,105) + ((0,356 \cdot 0,900 + 0,358 \cdot 0,100) \cdot 0,258)$$

$$= 0,371 \rightarrow 37,1\%$$

Die Alternative „VW“ weist mit 37,1 % die höchste Bewertung auf und ist zu favorisieren.

3.5.3. Einsatzbereiche des AHP

Der Analytische-Hierarchie-Prozess ist eine weit verbreitete Methode in der Betriebswirtschaftslehre mit Schwerpunkt in der strategischen Planung und vereinzelt im Controlling (LINGNAU 2007). So existieren eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen aus den Bereichen Militär, Gesundheit, Regierung und Industrie (BHUSAN & RAI 2004; SAATY 1982). Ebenso wird seit einigen Jahren versucht, den AHP im Bereich der Risikobewertung einzusetzen (DEY 2002; LINGNAU et al. 2007).

3.5.4. Eignung des AHP für das WASKlim-EUS

Eine einfache aber weit verbreitete Alternative zum AHP ist die holistische Kriteriengewichtung (~ ganzheitlichen Einschätzung, „aus dem Bauch heraus“). Nachteilig hierbei ist jedoch eine mangelnde Nachvollziehbarkeit der Entscheidung und, sobald eine größere Anzahl von Kriterien zu bewerten ist, die fehlende Übersichtlichkeit. Der AHP hingegen ermöglicht es dem Bewerter, den Entscheidungsraum in mehrere Einzelentscheidungen aufzuteilen und dadurch übersichtlicher zu gestalten. Das paarweise Vergleichen entspricht dem natürlichen Verhalten des Menschen und ist von Dritten einfacher nachzuvollziehen (LINGNAU et al. 2007). Nachteilig erweist sich jedoch der teilweise größere Aufwand für die Bearbeitung der Evaluationsmatrix (Bewertungsmatrix). Da die Zahl an Paarvergleichen mit wachsender Kriterienanzahl rasch ansteigt (Tabelle 3.30), empfiehlt WEBER die Anzahl der Kriterien auf maximal sieben zu beschränken (WEBER 1993).

Tabelle 3.30: Anzahl der Paarvergleiche in Abhängigkeit der Kriterienanzahl

Kriterienanzahl	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Paarvergleiche	1	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66	78	91	105

Ein weiterer Nachteil bei der Anwendung des AHP entsteht durch Hinzunahme oder Weglassen einer Alternative. Dabei können sogenannter Rank-Reversal Effekte auftreten, bei denen sich die Gesamtpräferenz zweier Alternativen vertauschen (DYER 1990; LINGNAU et al. 2007; MEIXNER & HAAS 2002; NITZSCH 1992; SATO 2001).

Für das neu entwickelte „WASKlim-EUS“ kommen beide o.g. Möglichkeiten zum Einsatz. Der Entscheidungsträger kann somit frei wählen, ob er die AHP-Methode oder die holistische Gewichtung (HG) verwenden möchte.

3.5.5. Nutzwertanalyse (NWA)

Die Nutzwertanalyse ist ein Verfahren zur Alternativenbewertung. Es ist ein mehrdimensionales (geschlossenes) Verfahren, das geeignet ist, auch nichtmonetäre Größen zu berücksichtigen. Das Verfahren kann keine absolute Abwägung (ja / nein) durchführen, sondern nur unter Alternativen die relativ günstigste herausuchen (BRETSCHNEIDER et al. 1993 & DVWK 1989). Es werden die Alternativen aufgeführt und die einzelnen Bewertungskriterien mit einer Gewichtung versehen. Die Bewertungen aller Kriterien werden erfasst und anhand von Messskalen in Zielwerte übertragen. Diese Zielwerte sind als Bewertungszahl beispielsweise nach Schulnoten (von 1 bis 5) vergleichbar. Sie werden mit den Zielgewichten multipliziert und somit in Teilnutzwerte umgewandelt. Die Summe aller Teilnutzwerte einer Alternative ergibt den Nutzwert der Alternative. Aus dem Vergleich der Nutzwerte folgt die zu wählende Alternative. Dabei ist die Alternative mit dem höchsten Nutzwert zu favorisieren (Tabelle 3.31, Alternative „VW“).

Vom Entscheidungsträger sind vor Verwendung der Nutzwertanalyse festzulegen:

- die relativen Zielgewichte der einzelnen Bewertungskriterien
- die Bewertung (Zielwerte für die Erreichung eines jeden Zieles in jeder Alternative)

Tabelle 3.31: Nutzwertanalyse verschiedener Alternativen, Bewertung: 0 = schlechtester Wert;
5 = bester Wert

Bewertungs- kriterien	Anschaft- fungskosten	Unterhalts- kosten	Leistung	Kraftstoff	Kohlen- dioxid	Nutzwert
Zielgewichte	0,50	0,15	0,10	0,20	0,05	$\Sigma = 1,00$
Projekt- alternativen	Z I E L W E R T E					
Audi	2	1	4	3	2	$\Sigma = 2,25$
BMW	1	2	5	2	1	$\Sigma = 1,75$
VW	3	4	3	4	3	$\Sigma = 3,35$ (Max)

Je nach Problemstellung können für eine Entscheidungsfindung unterschiedliche Mehrkriterienverfahren oder andere Entscheidungstechniken angewandt werden (z.B. Zielbaum zur strukturierten Gewichtung). Sowohl die Nutzwertanalyse als auch der Analytische-Hierarchie-Prozess sind im vorliegenden Fall geeignet. Der wesentliche Vorteil der Nutzwertanalyse ist die einfache Anwendung und die Übersichtlichkeit. Verbessert werden kann die Nutzwertanalyse indem die Zielgewichtung, wie bei der AHP-Methode, durch paarweisen Vergleich erfolgt (JACOBY & KISTENMACHER 1998, ZANGEMEISTER 1970, BUCK 2005). Dieser kombinierter Ansatz kann im WASKlim-EUS verwendet werden.

3.6 Stakeholderbeteiligung

Ein wesentlicher Bestandteil des neuen EUS ist die Integration der Experten vor Ort. Je mehr Fachleute bei der Erstellung des WASKlim-EUS beteiligt sind, desto umfassender ist das zu ermittelnde Gesamtbild über die Vulnerabilität und die möglichen Anpassungsmaßnahmen des zu untersuchenden Flusseinzugsgebietes. Daher kann es vorkommen, dass mehrere Experten zu der gleichen Wassernutzung befragt werden. Dabei stellt sich die Frage, wie man mit unterschiedlichen Aussagen zu einer Wassernutzung umgeht. Prinzipiell existieren zwei unterschiedliche Möglichkeiten.

1. Möglichkeit:

Jede Expertenbefragung zu einer Wassernutzung wird als gleichwertig anerkannt und entsprechend in das WASKlim-EUS eingegeben. Dadurch kann die Sensitivität des Systems getestet und die Robustheit der Gesamtantwort überprüft werden. Ist die Robustheit des Systems nicht gegeben, kann mit Möglichkeit 2 fortgefahren werden.

2. Möglichkeit:

Aus mehreren vorliegenden Einzelmeinungen zu einer Wassernutzung wird versucht eine Gruppenmeinung zu bilden. Hierzu kann das sogenannte Verfahren des Gruppendelphi angewendet werden (SCHULZ & RENN 2009). Dabei werden die Experten zu einem gemeinsamen Workshop eingeladen. Die Teilnehmer werden in Kleingruppen aufgeteilt und gebeten die Fragen des vorgegebenen Fragebogens zu diskutieren und gemeinsame Antworten zu finden. Ein Konsens wird dabei angestrebt, allerdings sind

auch abweichende Voten möglich. Im Plenum müssen diejenigen Experten, deren Bewertungen signifikant vom Mittelwert der anderen Teilnehmer abweichen, ihren Standpunkt anschließend eingehend begründen und verteidigen. Dabei gilt es herauszufinden, worin der Dissens begründet liegt und ob die Diskrepanzen durch Informationen und Argumente der anderen Experten aufzulösen sind. Anschließend werden die Kleingruppen rotiert und das Verfahren beginnt von Neuem bis keine signifikanten Verschiebungen der Standpunkte mehr auftreten (RENN & WEBLER 1998, WEBLER et al. 1991).

3.7 Anwendungsbeispiel

In diesem Unterkapitel wird aufgezeigt, wie das neu entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem im Detail funktioniert. Anhand dreier Wassernutzungen und fiktiv gewählter hydrologischer Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen werden Bewertungen beispielhaft nachgestellt und das gesamte Prozedere bis zur Zustandsbewertung erläutert. Anhand synthetischer Klimaszenarien werden mögliche Auswirkungen auf den Zustand der betrachteten Wassernutzungen aufgezeigt und die Sensitivität der gewählten Parameter dargestellt. Darin enthalten ist ebenfalls eine Sensitivitätsuntersuchung hinsichtlich der Kenngrößengewichte, welche vergleichsweise mittels AHP (Kapitel 3.5.1) und holistisch gewichtet (HG) erfolgt (Kapitel 3.2.2). Anschließend werden realistische Maßnahmen vorgeschlagen und mit Hilfe einer NWA und des AHP bewertet.

Anwendungsbeispiel:

Ein rund 850 km² großes Einzugsgebiet im Mittelgebirge soll hinsichtlich der wasserwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels untersucht werden. Es ist der heutige und zukünftige Zustand der im Einzugsgebiet vorhandenen Wassernutzungen aufzuzeigen. Für die vulnerablen Wassernutzungen sind Anpassungsmaßnahmen unabhängig von den Kosten darzustellen und im Hinblick auf ausgewählte Bewertungskriterien zu priorisieren. Folgende Angaben wurden durch Stakeholderbefragungen (die Angaben in den weißen Feldern der Tabelle 3.32 ff) für die Wassernutzungen „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“, „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“ und für „Einleitungen aus Kläranlagen“ erhoben.

Tabelle 3.32: Bewertung der hydrologischen Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“

Trinkwasserversorgung aus Grundwasser (TW aus GW)								
Nr.	Hydrologische Kenngrößen	äußerst schlecht	sehr schlecht	schlecht	zufriedenstellend	gut	sehr gut	äußerst gut
1.	GWN (J)	70%	-	85%	95-100%	110%	-	130%
2.	GWN (S)	80%	90%	95%	98-105%	115-120%	140%	170%
Nr.	Entwicklungskenngrößen	sehr viel ⁸ mehr	viel mehr	mehr	gleich viel	weniger	viel weniger	sehr viel weniger
1.	Bev.Entw.	120%	-	110%	105-95%	-	-	80%
2.	L-Temp (S)	120%	-	-	105-85%	-	-	90%
3.	Ökon.Sw.	„weniger“	Hier liegen keine Zukunftsszenarien vor, daher ist eine einfache Einschätzung zwischen „sehr viel mehr“ und „sehr viel weniger“ vorzunehmen.					

Tabelle 3.33: Bewertung der hydrologischen Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“

Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke (BW aus OW)								
Nr.	Hydrologische Kenngrößen	äußerst schlecht	sehr schlecht	schlecht	zufriedenstellend	gut	sehr gut	äußerst gut
1.	MQ (S)	80%	-	100%	105-115%	-	-	140%
2.	MNQ (S)	70%	80%	-	105-110%	115%	-	130%
3.	UZ<MNQ (S)	150%	130%	115-110%	100-90%	80-70%	60%	50%
4.	W-Temp (S)	120%	110%	105%	102-98%	95%	90%	85%
Nr.	Entwicklungskenngrößen	sehr viel mehr	viel mehr	mehr	gleich viel	weniger	viel weniger	sehr viel weniger
1.	Bev.Entw.	130%	-	-	100%	-	-	70%
2.	L-Temp (S)	115%	-	-	100%	-	-	85%
3.	L-Temp (W)	90%	-	-	100%	-	-	110%
4.	Ökon.Sw.	„mehr“	Hier liegen keine Zukunftsszenarien vor, daher ist eine einfache Einschätzung zwischen „sehr viel mehr“ und „sehr viel weniger“ vorzunehmen.					

⁸ „sehr viel mehr“ bedeutet, dass zukünftig „sehr viel mehr“ Wasser als heute benötigt wird (Kapitel 3.2.2)

Tabelle 3.34: Bewertung der hydrologischen Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“

Einleitung aus Kläranlagen (Einl. aus Kläranl.)							
Nr. Hydrologische Kenngrößen	äußerst schlecht	sehr schlecht	schlecht	zufriedenstellend	gut	sehr gut	äußerst gut
1. MNQ (S)	80%	-	-	100-105%	110%	-	150%
2. UZ<MNQ (S)	150%	-	100%	90%	-	-	50%
3. W-Temp (S)	120%	-	-	95%	-	-	90%
Nr. Entwicklungskenngrößen	sehr viel mehr	viel mehr	mehr	gleich viel	weniger	viel weniger	sehr viel weniger
1. Bev.Entw.	120%	-	-	100%	-	-	70%
2. Ökon.Sw.	„weniger“	Hier liegen keine Zukunftsszenarien vor, daher ist eine einfache Einschätzung zwischen „sehr viel mehr“ und „sehr viel weniger“ vorzunehmen.					

Für die Gewichtung der Kenngrößen werden sowohl die AHP-Methode als auch eine holistische Gewichtung (HG) durchgeführt (Tabelle 3.35ff).

Tabelle 3.35: Gewichtung der hydrologischen Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ mittels AHP- und holistischer Gewichtung (HG)

Trinkwasserversorgung aus Grundwasser (TW aus GW)						
Hydrologische-KG	GWN (J)	GWN (S)	-	-	AHP	HG
1. GWN (J)	0	-1	-	-	25%	30%
2. GWN (S)		0	-	-	75%	70%
3. -			0	-	-	-
4. -				0	-	-
Inkonsistenz: 0,00 < 0,1 i.O.						
Entwicklungs-KG	Bev.Entw.	L-Temp (S)	Ökon.Sw.	-	AHP	HG
1. Bev.-Entw.	0	-1	0	-	20%	30%
2. L-Temp (S)		0	1	-	60%	40%
3. Ökon.Sw.			0	-	20%	30%
4. -				0	-	-
Inkonsistenz: 0,00 < 0,1 i.O.						

Tabelle 3.36: Gewichtung der hydrologischen Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“ mittels AHP- und holistischer Gewichtung (HG)

Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke (BW aus OW f. Kühlzwecke)						
Hydrologische-KG	MQ (S)	MNQ (S)	UZ<MNQ(S)	W-Temp(S)	AHP	HG
1. MQ (S)	0	-2	-2	-2	6,3%	10%
2. MNQ (S)		0	0	0	31,3%	30%
3. UZ<MNQ (S)			0	0	31,3%	30%
4. W-Temp (S)				0	31,3%	30%
Inkonsistenz: 0,00 < 0,1 i.O.						
Entwicklungs-KG	Bev.Entw.	L-Temp(S)	L-Temp(W)	Ökon.Sw.	AHP	HG
1. Bev.Entw.	0	-1	2	1	26,2%	30%
2. L-Temp (S)		0	3	2	56,5%	40%
3. L-Temp (W)			0	-1	5,5%	10%
4. Ökon.Sw.				0	11,8%	20%
Inkonsistenz: 0,04 < 0,1 i.O.						

Tabelle 3.37: Gewichtung der hydrolog. Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen der Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“ mittels AHP- und holistischer Gewichtung (HG)

Einleitung aus Kläranlagen (Einl. aus Kläranl.)						
Hydrologische-KG	MNQ (S)	UZ<MNQ(S)	W-Temp(S)	-	AHP	HG
1. MNQ (S)	0	0	0	-	33,3%	33,3%
2. UZ<MNQ (S)		0	0	-	33,3%	33,3%
3. W-Temp (S)			0	-	33,3%	33,3%
4. -				0	-	-
Inkonsistenz: 0,00 < 0,1 i.O.						
Entwicklungs-KG	Bev.Entw.	Ökon.Sw.	-	-	AHP	HG
1. Bev.Entw.	0	1	-	-	75%	70%
2. Ökon.Sw.		0	-	-	25%	30%
3. -			0	-	-	-
4. -				0	-	-
Inkonsistenz: 0,00 < 0,1 i.O.						

Die Bewertungsskala von -3 bis +3 (Tabelle 3.35ff) wird für die Berechnung der AHP-Gewichtung in die entsprechende AHP-Skala übertragen (Tabelle 3.38).

Tabelle 3.38: Übertragung der Bewertungsskala in die AHP-Skala

Bewertungsskala	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
AHP-Skala	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7

Zustandsbewertung

Anhand dieser Eingabedaten erstellt das WASKlim-EUS das Fuzzy-Logik Regelwerk. Dabei werden den Bewertungsstufen „äußerst gut“ bis „äußerst schlecht“ für das Wasserdargebot und den Bewertungsstufen „sehr viel mehr“ bis „sehr viel weniger“ für den Wasserbedarf die numerische Bewertung von „-3“ bis „+3“ zugeordnet. Den linguistischen Eingabedaten werden somit Dreiecks- oder Trapezfunktion zugewiesen. Beispielsweise ergeben sich für die in Tabelle 3.32 angegebenen Eingabedaten der hydrologischen Kenngrößen „GWN (J)“ und „GWN (S)“ die Zugehörigkeitsfunktionen in der linken Seite der Abbildung 3.32. Auf der rechten Seite der Abbildung 3.32 sind graphisch die Funktionen der Schlussfolgerungen (Konklusion), also der Fuzzy-Ausgabe-Mengen, angegeben. Die Funktionen der Schlussfolgerung (Fuzzy-Ausgabe-Mengen) werden im WASKlim-EUS als gleichschenklige Dreiecksfunktionen dargestellt. Durch das Regelwerk werden die Zugehörigkeitsfunktionen den Funktionen der Schlussfolgerungen zugewiesen. Greift beispielsweise die Zugehörigkeitsfunktion „äußerst schlecht“, so wird die (Dreiecks-) Funktion „-3“ der Schlussfolgerung angesprochen.

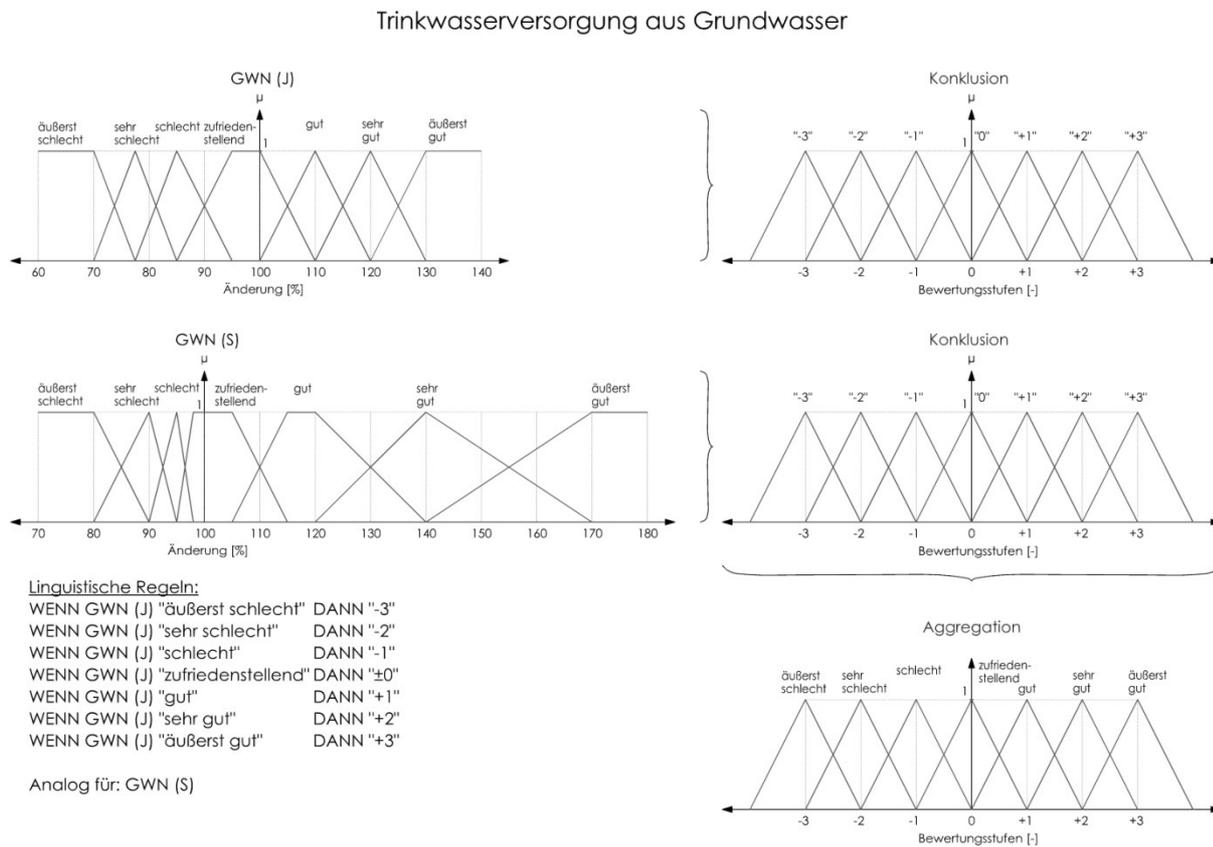


Abbildung 3.32: Fuzzy-Logik Regelwerk für die hydrologischen Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“

Nach Aufstellung der Zugehörigkeitsfunktionen, der Schlussfolgerungen und des linguistischen Regelwerkes (Abbildung 3.32) werden Eingabedaten hinsichtlich des zu untersuchen Szenarios benötigt. Diese Eingabedaten bestehen aus den hydrologischen Kenngrößen und den Entwicklungskenngrößen. Für das vorliegende Anwendungsbeispiel wurden synthetische Szenarien verwendet, welche in Tabelle 3.39 enthalten sind.

Tabelle 3.39: Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen für das Beispiel

	Hydrologische Kenngrößen			Entwicklungskenngrößen	
	2021-2050	2071-2100		2021-2050	2071-2100
MQ (J)	98 %	95 %	Bev.Entw.	88 %	84 %
MNQ (S)	92 %	86 %	L-Temp (S)	106 %	112 %
UZ<MNQ (S)	117 %	132 %	L-Temp (W)	104 %	109 %
GWN (J)	84 %	86 %	Ökon.Sw.		
GWN (S)	82 %	81 %			
W-Temp (S)	104 %	108 %			

Die Abbildung 3.33 zeigt das Fuzzy-Regelwerk und die graphische Auswertung der Fuzzy-Regeln anhand des synthetischen Szenarios aus Tabelle 3.39. In diesem Szenario reduziert sich die jährliche Grundwasserneubildungsrate auf 84 % im Vergleich zum Zustand von heute. Ebenfalls reduziert sich die Grundwasserneubildungsrate im Sommerhalbjahr auf 82 % gegenüber heute. Nach Anwendung der Produktregel greifen für jede o.g. Kenngröße zwei Fuzzy-Regeln. Im oberen Beispiel GWN (J) die Regel für „sehr schlecht“ und die Regel für „schlecht“. In Abbildung 3.33 ist dies graphisch rot bzw. schraffiert dargestellt.

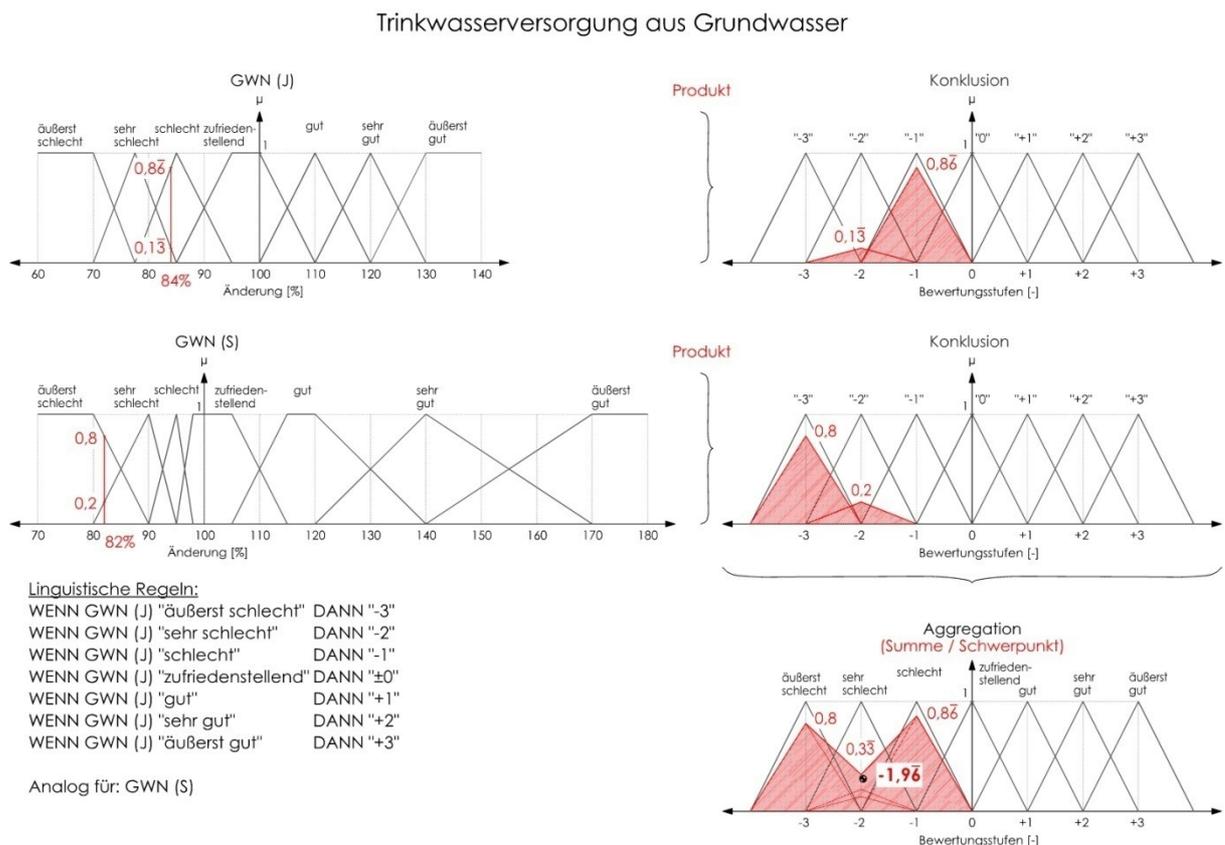


Abbildung 3.33: Fuzzy-Logik Regelwerk für die hydrologischen Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ und ein synthetisches Klimaszenario incl. Auswertung

Für die Ermittlung des Gesamtergebnisses sind die Teilergebnisse der zwei Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) mittels der Maximumregel zu überlagern. Aus dieser Überlagerung der „Einzeldreiecke“ entsteht eine neue Fläche, die in der unteren rechten Hälfte der Abbildung 3.33 schraffiert (rot) dargestellt ist. Anhand der Schwerpunktmethode wird das Gesamtergebnis der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ berechnet. Das numerische Ergebnis beträgt $-1,9\bar{6}$. Das linguistische Ergebnis befindet sich bei einem fast „sehr schlechten“ Zustand. Dieses Beispiel zeigt, wie prinzipiell die Ermittlung der Zustandsbewertung der untersuchten Wassernutzungen erfolgt.

Im WASKlim-EUS ist zusätzlich die Gewichtung der verschiedenen Kenngrößen enthalten. Wird die AHP Gewichtung, wie sie in Tabelle 3.35 für GWN (J) und GWN (S) angegeben ist, verwendet, stellt sich folgendes Bild ein (Abbildung 3.34):

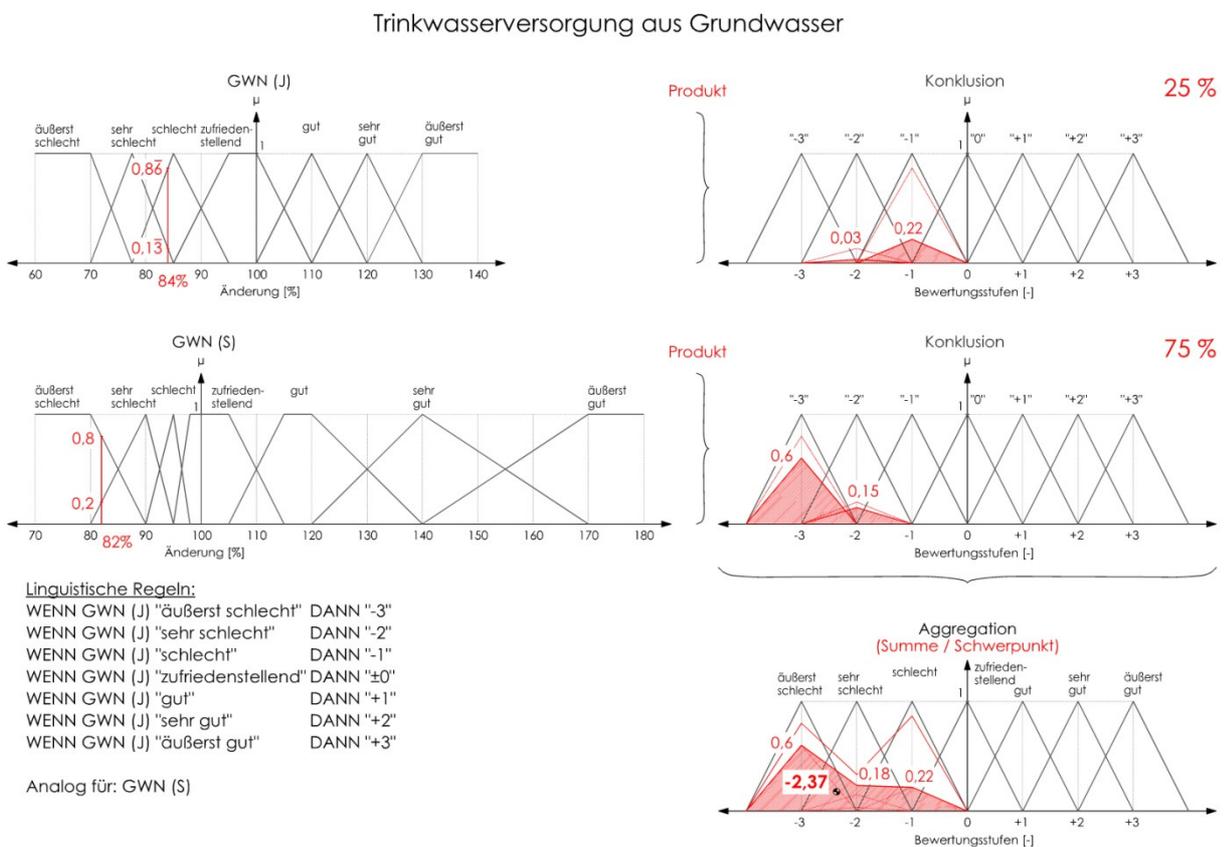


Abbildung 3.34: Fuzzy-Logik Regelwerk für die hydrologischen Kenngrößen GWN (J) und GWN (S) der „TW aus GW“ und ein synthetisches Klimaszenario incl. Auswertung und Gewichtung (GWN (J) = 25 %; GWN (S) = 75 %)

Wird nun das Gesamtergebnis mit Hilfe der Schwerpunktmethode berechnet, verschlechtert sich das Ergebnis auf $-2,37$, was einem Zustand zwischen „sehr schlecht“ und „äußerst schlecht“ entspricht. Dies tritt ein, da das Teilergebnis von GWN (J) lediglich zwischen „-1“ und „-2“ lag und das Teilergebnis von GWN (S) zwischen „-2“ und „-3“. Durch die höhere Gewichtung von GWN (S) mit 75 % verschlechterte sich somit auch das Gesamtergebnis von $-1,97$ auf $-2,37$. Verwendet man anstatt der AHP Gewichtung die holistische Gewichtung aus

Tabelle 3.35 mit GWN (J) = 30 % und GWN (S) = 70 %, so beträgt das Gesamtergebnis -2,30. Eine Verschiebung um 5 % bei der Gewichtung bewirkt eine Änderung des Gesamtergebnisses von ca. 3 %.

Folgende Tabelle 3.40 stellt die Ergebnisse der Zustandsermittlung für die synthetischen Szenarien dar:

Tabelle 3.40: Zustandsbewertung der Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“

Wassernutzung: Trinkwasserversorgung aus Grundwasser								
	2021-2050	Bew.	Gew.	Ges.	2071-2100	Bew.	Gew.	Ges.
GWN (J)	84%	-1,13	25%	-0,27	86%	-0,90	25%	-0,22
GWN (S)	82%	-2,80	75%	-2,10	81%	-2,90	75%	-2,18
W-Dargebot				-2,37				-2,40
Bev.Entw.	88%	1,40	20%	0,28	84%	2,20	20%	0,44
L-Temp (S)	106%	-0,20	60%	-0,12	112%	-1,40	60%	-0,84
Ökon.Sw.		1,00	20%	0,20		1,00	20%	0,20
W-Bedarf				0,36				-0,20
Zustand		2021-2050:		-2,01		2071-2100:		-2,60

Für die Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ verschlechtert sich der Zustand bis zum Jahr 2050 auf -2,01 und bis zum Jahr 2100 auf -2,60.

Tabelle 3.41: Zustandsbewertung der Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“

Wassernutzung: Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke								
	2021-2050	Bew.	Gew.	Ges.	2071-2100	Bew.	Gew.	Ges.
MQ (J)	98%	-1,20	6%	-0,07	95%	-1,50	6%	-0,09
MNQ (S)	92%	-1,04	31%	-0,33	86%	-1,52	31%	-0,48
UZ<MNQ	117%	-1,13	31%	-0,35	132%	-2,10	31%	-0,66
W-Temp (S)	104%	-0,67	31%	-0,21	108%	-1,60	31%	-0,50
W-Dargebot				-0,96				-1,73
Bev.Ent.	88%	1,20	26%	0,32	84%	1,60	26%	0,42
L-Temp (S)	106%	-1,20	57%	-0,68	112%	-2,40	57%	-1,36
L-Temp (W)	104%	1,20	6%	0,07	109%	2,70	6%	0,16
Ökon.Sw.		-1,00	12%	-0,12		-1,00	12%	-0,12
W-Bedarf				-0,41				-0,90
Zustand		2021-2050:		-1,37		2071-2100:		-2,63

Für die Wassernutzung „Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser für Kühlzwecke“ (Tabelle 3.41) verschlechtert sich der Zustand bis zum Jahr 2050 auf -1,37 und bis zum Jahr 2100 auf -2,63.

Tabelle 3.42: Zustandsbewertung der Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“

Wassernutzung: Einleitung aus Kläranlagen								
	2021-2050	Bew.	Gew.	Ges.	2071-2100	Bew.	Gew.	Ges.
MNQ (S)	92%	-1,20	33%	-0,40	86%	-2,10	33%	-0,70
UZ<MNQ	117%	-1,68	33%	-0,56	132%	-2,28	33%	-0,76
W-Temp (S)	104%	-1,08	33%	-0,36	108%	-1,56	33%	-0,52
W-Dargebot				-1,32				-1,98
Bev.Ent.	88%	1,20	75%	0,90	84%	1,60	75%	1,20
Ökon.Sw.		1,00	25%	0,25		1,00	25%	0,25
W-Bedarf				1,15				1,45
Zustand		2021-2050: -0,17				2071-2100: -0,53		

Für die Wassernutzung „Einleitung aus Kläranlagen“ (Tabelle 3.42) verschlechtert sich der Zustand bis zum Jahr 2050 auf -0,17 und bis zum Jahr 2100 auf -0,53. In nachstehender Tabelle 3.43 sind die Ergebnisse der Zustandsbewertung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Gewichtung mit AHP oder mit der holistischen Gewichtung (HG) dargestellt. Es zeigt sich, dass trotz größeren Abweichungen in den Gewichtungen die Tendenz der Ergebnisse erhalten bleibt und die Größenordnung sich nicht wesentlich unterscheidet.

Tabelle 3.43: Vergleich der AHP- und der holistischen Gewichtung (HG)

	TW aus GW		BW aus GW		Einleitung aus Kläranl.	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AHP	-2,01	-2,60	-1,37	-2,63	-0,17	-0,53
EG	-1,66	-1,90	-1,17	-2,13	-0,18	-0,56

Anpassungsstrategie

Durch eine fiktive Expertenbefragung wurden folgende Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen und nach den vorgegebenen Kriterien bewertet und gewichtet (Tabelle 3.44f).

Tabelle 3.44: Mögliche Anpassungsmaßnahmen incl. Herstell- und laufende Kosten

Nr.	Bezeichnung	Herstellkosten (geschätzt)	Laufende Kosten (geschätzt)
M I	Anzahl und Größe der Wasserschutzgebiete ausweiten und die Wasserförderung erhöhen	100.000 €	0 €
M II	Wassersparmaßnahmen verstärkt finanziell fördern	200.000 €	500.000 €
M III	Kühlturm bauen	3.000.000 €	100.000 €
M IV	Auf Umluftkühlung umrüsten	1.000.000 €	100.000 €
M V	Höheren Mindestwasserabfluss im Gewässer festschreiben (Wasserentnahmen begrenzen)	300.000 €	0 €
M VI	Einleitungsgrenzwerte bei extremen Niedrigwassersituationen variabler gestalten	100.000 €	0 €

Die Skala der Maßnahmenbewertung (Tabelle 3.45) reicht ebenfalls von -3 (äußerst schlecht) bis +3 (äußerst gut). Der Wert „0“ bedeutet, dass die Maßnahme keinen positiven oder negativen Einfluss auf die gewählte Wassernutzung hat.

Tabelle 3.45: Maßnahmenbewertung der Wassernutzung

TW aus GW	Gewichtung	M I	M II	M III	M IV	M V	M VI
Nutzen kurz-/mittelfristig	10 %	+2	+2	0	0	0	0
Nutzen langfristig	30 %	+3	+2	0	0	0	0
Beitrag zum Klimaschutz	20 %	+2	+3	0	0	0	0
Resilienz	30 %	+3	+1	0	0	0	0
Nutzungskonflikte	10 %	-1	-1	0	0	0	0
Gewichtung	50 %	+2,3	+1,6	0	0	0	0

BW aus OW f. Kühlzw.	Gewichtung	M I	M II	M III	M IV	M V	M VI
Nutzen kurz-/mittelfristig	20 %	0	0	+3	+3	-3	-1
Nutzen langfristig	15 %	0	0	+3	+3	-3	-1
Beitrag zum Klimaschutz	5 %	0	0	-1	+1	+3	-1
Resilienz	10 %	0	0	+1	+1	0	0
Nutzungskonflikte	50 %	0	0	-3	0	-3	-3
Gewichtung	25 %	0	0	-0,4	+1,2	-2,4	-1,9

Einl. aus Kläranlagen.	Gewichtung	M I	M II	M III	M IV	M V	M VI
Nutzen kurz-/mittelfristig	20 %	0	+1	0	0	+3	+3
Nutzen langfristig	20 %	0	+1	0	0	+3	+3
Beitrag zum Klimaschutz	10 %	0	+3	0	0	+3	0
Resilienz	20 %	0	+1	0	0	0	+1
Nutzungskonflikte	30 %	0	-1	0	0	-2	-2
Gewichtung	25 %	0	+0,6	0	0	+0,9	+0,8
Gesamtbewertung		+1,15	+0,95	-0,10	+0,30	-0,38	-0,28

Nach Ausmultiplikation der Bewertungszahlen mit den entsprechenden Gewichtungen ergeben sich die Ergebnisse in Tabelle 3.45. Werden die Wassernutzungen untereinander ebenfalls gewichtet, so kann man eine Gesamtbewertung der Maßnahmen errechnen (letzte Zeile Tabelle 3.45). Nach den vorliegenden Bewertungen und Gewichtungen ergibt sich ein leichter Vorsprung für die Maßnahme I „Anzahl und Größe der Wasserschutzgebiete ausweiten und die Fördermenge erhöhen“. Nicht zu empfehlen sind die Maßnahmen III, V und VI, da sie eine negative Gesamtbewertung aufweisen. Da die Maßnahme I zudem mit lediglich geringen Herstellkosten und ohne laufende Kosten eingestuft wurde, unterstützt dies die o.g. Gesamtbewertung. Da die Wassernutzung Trinkwasserversorgung aus Grundwasser auch in der Zustandsbewertung als „sehr schlecht“ eingestuft wurde, ist die Maßnahme I, die im Wesentlichen dieser Wassernutzung dient, zu favorisieren. Die Maßnahmen II und IV sind jedoch ebenfalls in die engere Entscheidung mit einzubinden, da auch sie eine positive Bewertung aufzeigen.

3.8 Übertragbarkeit und Grenzen

Wesentlicher Bestandteil der Aufgabenstellung war es, ein Entscheidungsunterstützungssystem zu entwickeln, dessen methodischer Ansatz auf andere Bereiche übertragbar ist. ZEBISCH et al. (2005) geben hierzu eine Auswahl an möglichen Bereichen an. Dies könnten neben der Wasserwirtschaft u.a. die Land- und Forstwirtschaft, die Gesundheit, der Tourismus, der Verkehr oder die Biodiversität und der Naturschutz sein. In der DAS (Kapitel 2.5) werden diese Bereiche noch ergänzt durch das Bauwesen, den Küsten- und Bodenschutz, die Energie- und Finanzwirtschaft, den Katastrophen- und Bevölkerungsschutz sowie durch die Raum- und Siedlungsentwicklung (BUNDESREGIERUNG 2008).

Die Übertragbarkeit des WASKlim-EUS als Methode ist dann gewährleistet, wenn der zu untersuchende Bereich anhand bestimmter meteorologischer oder hydrologischer Kenngrößen erfassbar ist. Sofern man beispielsweise sagen kann, dass die durchschnittliche Gesundheit von der zukünftigen Lufttemperatur abhängt, kann dies in einer Fuzzy-Regel erfasst, in das Entscheidungsunterstützungssystem eingegeben und der zukünftige Zustand im Bereich Gesundheit berechnet werden.

Das Prinzip, das (Wasser-) Dargebot dem (Wasser-) Bedarf gegenüber zu stellen, ist ebenfalls übertragbar. Allgemein formuliert kann das Dargebot als Angebot und der Bedarf als Nach-

frage formuliert werden. Beispielsweise könnte die Touristenzahl in einer bestimmten Region steigen, falls sich die Temperatur entsprechend erhöht und der Niederschlag zurückgeht. Dies kann als Angebot bezeichnet werden. Die Nachfrage kann jedoch von ganz anderen Kriterien abhängen. Beispielsweise könnte auch hier der ökonomische Strukturwandel als Kenngröße herangezogen werden. Sollte die Kaufkraft beispielsweise zukünftig rückläufig sein, so wird man das vorhandene Angebot aufgrund einer negativen Nachfrageentwicklung nicht auslasten können. Die Methodik der Maßnahmenbewertung ist unabhängig von der Wasserwirtschaft, daher ist auch hier die Übertragbarkeit gewährleistet.

3.9 Optionen zur Weiterentwicklung

Derzeit basiert die Bewertung der Anpassungsmaßnahmen auf Kriterien wie Nutzen kurzfristig, Nutzen mittel-/langfristig, Beitrag zum Klimaschutz, Resilienz und Nutzungskonflikten. Monetäre Größen werden derzeit lediglich verbal argumentativ berücksichtigt. Prinzipiell sollten bei langfristigen Anpassungsstrategien monetäre Größen eine nur untergeordnete Rolle spielen, da oben genannte Kriterien einen höheren Stellenwert in der Gesellschaft einnehmen.

Bei der Bewertung von Anpassungsmaßnahmen kann jedoch der Fall auftreten, dass mehrere Maßnahmen unabhängig der monetären Größe gleich oder ähnlich sinnvoll erscheinen. Bei solchen Konstellationen können, neben weiteren verbal argumentativen Gründen (Anhang A.3.), monetäre Größen in die Bewertung mit einfließen. Dabei sollten jedoch nicht nur die Herstellkosten sondern auch die Unterhaltskosten (laufende Kosten) und Reinvestitionskosten in Abhängigkeit der Lebensdauer der Maßnahmen bzw. Baugruppen berücksichtigt werden. Die LAWA (1992, 2005) empfiehlt hierzu die Verwendung der Kapitalwertmethode. In diesem Verfahren werden alle oben genannten Kosten inklusive der Zinsen und der Preisentwicklung berücksichtigt.

Die Methode der Kapitalwertbestimmung kann hinsichtlich zweier Betrachtungszeitpunkte unterschieden werden. Zum einen kann der „Endwert“ betrachtet werden, der am Ende eines vorher festgelegten Betrachtungszeitraums entsteht und zum anderen der „Barwert“, der zu Beginn des Betrachtungszeitraumes vorliegt. Anzumerken ist dabei, dass bei beiden Bewertungen jeweils alle Kosten berücksichtigt werden. Das heißt, auch bei der Barwertbetrachtung werden die laufenden Kosten, die Zinsen und die Inflationsrate berücksichtigt.

Mit der Kapitalwertmethode werden alle bei einer Investition verbundenen Zahlungen auf einen Bezugszeitpunkt ab- oder aufgezinst. Durch diese ermittelten Barwerte bzw. Endwerte werden Zahlungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallen, vergleichbar. Die Summe der Bar- oder Endwerte aller Zahlungen, die während der Nutzungsdauer einer Investition anfallen, stellt den Kapitalwert einer Investition dar. Die Höhe des Kapitalwerts ist Beurteilungskriterium für die Wirtschaftlichkeit der Variante. Die Kapitalwertmethode hat den Nachteil, dass mit ihr Alternativen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern nicht ohne weiteres verglichen werden können, weil die Zeitunterschiede sich auf das Beurteilungskriterium – die Höhe des Kapitalwertes – auswirken. Um diesen Nachteil auszugleichen, kann z.B. der Betrachtungszeitraum bis auf das kleinste gemeinsame Vielfache der jeweiligen Nutzungsdauern vergrößert werden. Dies ist jedoch ein Lösungsweg, der i.d.R. zu großen Betrachtungszeiträumen führt.

Die BBR (1983) fordert zudem die Berücksichtigung aller Investitions- und Reinvestitionskosten im Betrachtungszeitraum. Demnach müssen die Herstellkosten für eine bestimmte Anlage mit einer Nutzungsdauer von z.B. 30 Jahren in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zweimal berücksichtigt werden. Das kommt besonders dann zum Tragen, wenn mehrere Anlageteile mit unterschiedlicher Nutzungsdauer hergestellt werden. Hierzu wird daher ein Kombinationsverfahren vorgeschlagen, das methodisch der Kapitalwertmethode entspricht, jedoch den rechnerischen Restwert am Ende des Betrachtungszeitraumes über eine integrierte Annuitätenrechnung berücksichtigt.

Da der Endwert, der am Ende der Betrachtungsdauer entsteht, noch weniger greifbar ist als der Barwert, wird für das WASKlim-EUS die Barwertmethode empfohlen. Der Barwert einer Investition wird folgendermaßen berechnet:

$$\text{Faktor } a = \frac{\left(\frac{r}{q}\right)^{R \cdot N} - 1}{\left(\frac{r}{q}\right)^N - 1} - 1 \left[\left(\frac{r}{q}\right)^{N \cdot (R-1)} \cdot \frac{q^{R \cdot N - T} - 1}{q^{N-1}} \right] \quad [-] \quad \text{Gleich. (3.21)}$$

$$\text{Barwert} = \text{Investition} \cdot \text{Faktor } a; \quad [\text{€}] \quad \text{Gleich. (3.22)}$$

ferner gilt:

$$q = 1 + \frac{p}{100} \quad \text{Gleich. (3.23)}$$

$$r = 1 + \frac{s}{100} \quad \text{Gleich. (3.24)}$$

$$R = \frac{T}{N} \quad (\text{aufgerundet auf ganze Zahl}) \quad \text{Gleich. (3.25)}$$

mit:

p = Zinssatz p.a. (Rendite) [%]

q = Zinssatz p.a. (Rendite) [-]

s = Kostensteigerung p.a. (Inflation) [%]

r = Kostensteigerung p.a. (Inflation) [-]

T = Betrachtungszeitraum [a]

N = Nutzungszeitraum [a]

R = Anzahl der in der Betrachtungszeitraum fallenden Investitionen bzw. Reinvestitionen (Investitionskette) [-]

4. Anwendung des WASKlim-EUS in drei Testregionen

In diesem Kapitel wird die Anwendung des neu entwickelten WASKlim-EUS anhand dreier mesoskaliger Flusseinzugsgebiete in Deutschland aufgezeigt (Einzugsgebietsfläche jeweils zwischen 500 – 1000 km²). Zu Beginn wird die Auswahl der Testregionen begründet, anschließend die verschiedenen Testregionen näher beschrieben, die verwendeten Eingangsdaten sowie die vorhandenen Wassernutzungen vorgestellt und letztendlich die jeweiligen Ergebnisse präsentiert. Zum Schluss werden Optimierungsmöglichkeiten und die Grenzen des Entscheidungsunterstützungssystems diskutiert.

4.1 Auswahl der Testregionen

Um einen repräsentativen Einblick in die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland zu erhalten, wurden für die Testläufe des WASKlim-EUS Flusseinzugsgebiete in verschiedenen Naturräumen in Deutschland ausgewählt. Das Vorgehen orientiert sich dabei an den naturräumlichen Einheiten „Tieflandregion“, „Mittelgebirgsregion“ und „(vor-) alpines Gebiet“. Dadurch können die Auswirkungen des Klimawandels auf Gebiete mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen erfasst werden. Zudem sollten die Gebiete eine deutliche Ausprägung von Nutzungskonflikten aufweisen. Hierzu zählen beispielsweise im Bereich von Niedrigwassersituationen Nutzungskonkurrenz zwischen Trinkwasserversorgung, Gewässerzustand und Wasserentnahmen für Kühlzwecke oder im Bereich von Hochwassersituationen Nutzungskonkurrenz zwischen Freizeitnutzung und Hochwasserrückhaltevolumen. Die Testgebiete sollten sich einheitlich der Mesoskala von bis zu 1.000 km² zuordnen lassen. Ebenso müsste eine gute Datenlage (Klima, Landnutzung, Bodendaten, Abflüsse etc.) vorhanden sein. Darüber hinaus sollte auch ein Kooperationsinteresse von relevanten Nutzergruppen und Stakeholdern bestehen.

Unter Berücksichtigung der o.g. Kriterien ergaben sich für die drei naturräumlichen Einheiten jeweils mehrere potenzielle Testgebiete, die zur Diskussion standen:

- Tiefland: Weser, Ems, Havel, Warnow, Salza, Wipper
- Mittelgebirge: Bode, Kinzig, Nahe, Mulde, Oberer Main, Obere Spree, Wupper
- Alpen (vorland): Loisach, Ammer, Obere Iller, Berchtesgadener Ach

Nach intensiver Prüfung der vorliegenden Unterlagen wurden in Absprache mit den jeweiligen Stakeholdern vor Ort die Einzugsgebiete der Wupper in Nordrhein-Westfalen, der Salza in Sachsen Anhalt und der Oberen Iller in Bayern ausgewählt (Abbildung 4.1). Im Weiteren werden die ausgewählten Testgebiete näher beschrieben.



Abbildung 4.1: Lage der Testgebiete (SCHERZER et al. 2010)

4.2 Datengrundlage

Für alle drei Testgebiete stand eine einheitliche Datengrundlage zur Verfügung. So konnten die Klimadaten von WETTREG (SPEKAT et al. 2007) und REMO (JACOB et al. 2008) basierend auf dem ECHAM 5 Modell und den SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 verwendet werden.

Für das digitale Höhenmodell wurde das frei verfügbare SRTM-3 Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 3 Bogensekunden (ca. 90 m) herangezogen. Da für die modellinterne Auflösung von WaSiM-ETH ein Raster von 500 m x 500 m verwendet wurde, ist die Genauigkeit der SRTM-3 Daten ausreichend.

Die Landnutzungsdaten stammen aus den CORINE Land Cover 2000 – Vektordatensätzen des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) (KEIL et al. 2005) für Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt. Für ganz Europa wurden 44 Landnutzungsklassen definiert, von denen 37 Klassen in Deutschland relevant sind.

Für die Beschreibung der Böden in den Testregionen wurde die Bodenübersichtskarte BÜK 1000 verwendet. Aus den in den Testgebieten vorhandenen 72 unterschiedlichen Leitbodenassoziationen wurden die benötigten bodenhydraulischen Parameter für den Topmodell Ansatz des WaSiM-ETH Modells abgeleitet (SCHULLA & JASPER 2007).

Die Kalibrierung und Validierung der Wasserhaushaltsmodelle erfolgte anhand eines oder mehrerer Durchflusspegel, deren Teileinzugsgebiete keine markante wasserwirtschaftliche Überprägung aufweisen, sowie für das Gesamtgebiet hinsichtlich der Bilanz.

Nähere Informationen zu den verwendeten Daten, zu den Kalibrierungs- und Validierungsergebnissen sowie zu der Szenarioplausibilität sind dem UBA Bericht (SCHERZER et al. 2010) zu entnehmen.

4.3 Eingangsdaten für das WASKlim-EUS

Alle verwendeten Eingangsdaten für das jeweilige Entscheidungsunterstützungssystem der drei Testgebiete sind im Anhang A.4. enthalten. Die Daten setzten sich aus den hydrologischen Kenngrößen, ermittelt mit Hilfe der Klimamodelle und des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH und den Entwicklungskenngrößen zusammen. Die Entwicklungskenngrößen bestehen u.a. aus Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung. Hierzu liegen, wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, verschiedene Varianten vor. Für die drei Testregionen wurde einheitlich die mittlere Bevölkerungsvorausberechnung in Deutschland, ermittelt aus allen zwölf Szenarien, herangezogen. Liegen detailliertere Bevölkerungsentwicklungszahlen vor, können zukünftig die Szenarien für das konkrete Einzugsgebiet verwendet werden. Zudem könnten im Hinblick auf eine Sensitivitätsanalyse alle zwölf Szenarien durchgerechnet werden. Neben der Kenngröße zur Bevölkerungsentwicklung wurden meteorologische Kenngrößen zur Temperatur- und Niederschlagsentwicklung verwendet, die ebenfalls aus den Klimaprojektionen stammen. Neben den hydrologischen Kenngrößen und den Entwicklungskenngrößen wurde mit Hilfe der Einschätzungen der Experten vor Ort das Fuzzy-Regelsystem aufgestellt. Methodisch wurde hierfür ein Fragebogen erstellt wie er unter Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde. Ergänzend zu den Fragebögen fanden bei Bedarf persönliche und telefonische Interviews statt, so dass letztendlich für alle drei Testgebiete entsprechende Daten erhoben werden konnten. Diese Angaben sind ebenfalls im Anhang A.4. enthalten.

4.4 Testregion Wupper

4.4.1. Beschreibung des Einzugsgebietes

Das Mittelgebirgs-Einzugsgebiet der Wupper hat eine Fläche von 813 km². Ihr Quellgebiet liegt bei Börlinghausen im Oberbergischen Kreis. Sie verläuft in einem ausgedehnten nördlichen Bogen von Ost nach West und mündet bei Leverkusen in den Rhein. Die Region ist sehr stark urban geprägt. Im Einzugsgebiet liegen die Städte Wuppertal, Remscheid, Solingen und Leverkusen mit einer Gesamteinwohnerzahl von ca. 950.000 Menschen. Das Einzugsgebiet weist eine hohe Dichte an Talsperren auf. Insgesamt sind 8 Brauchwasser- und 8 Trinkwassertalsperren an der Wupper und an der Dhünn, einem Nebenfluss der Wupper, vorhanden. Das gesamte Stauvolumen beträgt ca. 165,8 Mio. m³. Im Einzugsgebiet der Wupper befinden sich zudem 11 Klärwerke des Wupperverbandes. Über diese Klärwerke gelangt das zuvor aus den Talsperren abgeleitete Trinkwasser zurück in die Wupper (Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: Einzugsgebiet der Wupper (WUPPERVERBAND 2008)

Durch ein umfangreiches Verbundsystem der Anlagen ist eine Anpassung an die verschiedensten Wetterlagen permanent möglich. Über das Trinkwasserversorgungsnetz des Wupperverbandes werden pro Jahr mehrere Mio. Kubikmeter Wasser aus dem Teileinzugsgebiet der Dhünn in das Einzugsgebiet der Wupper übergeleitet. Die Stadtwerke Wuppertal und Solingen beziehen einen Teil ihres Trinkwassers über Wasserwerke, die ihr Rohwasser aus Uferfiltrat des Rheins gewinnen.

Durch das Talsperrennetz werden unterschiedliche Nutzungen wie die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung, die Bereitstellung von Brauchwasser für die Industrie, der Hochwasserschutz, die Gewährleistung einer Mindestwasserführung sowie Erholungsraum sichergestellt. Mittels einer permanenten Anpassung der Talsperrensteuerung versucht man der hierbei auftretenden Nutzungskonkurrenz gerecht zu werden. Geregelt wird dies bei den meisten Anlagen durch den Wupperverband. Aufgrund der komplexen Steuerung konnten die Talsperren nicht im Wasserhaushaltsmodell berücksichtigt werden. Somit beziehen sich die Angaben der Stakeholder jeweils auf den „potenziell natürlichen Zustand“ der Wupper und Dhünn. Insgesamt wurde die Vulnerabilität des Wassersektors in der Region nach ZEBISCH et al. (2005) als „mäßig“ eingestuft.

4.4.2. Hydrologische Belastung

Im EZG der Wupper herrscht ein humides Klima (Abbildung 4.3). An der Klimastation in Leverkusen (Gebietsauslass) beträgt der jährliche Niederschlag 774 mm bei einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 10,8 °C und 1427 Stunden Sonnenscheindauer im Jahr. In der Zeitreihe 1971-2000 betragen die hydrologischen Hauptwerte der Wupper 132 m³/s für MHQ, 18 m³/s für MQ und 0,5 m³/s für MNQ. Die GWN betrug 432 mm.

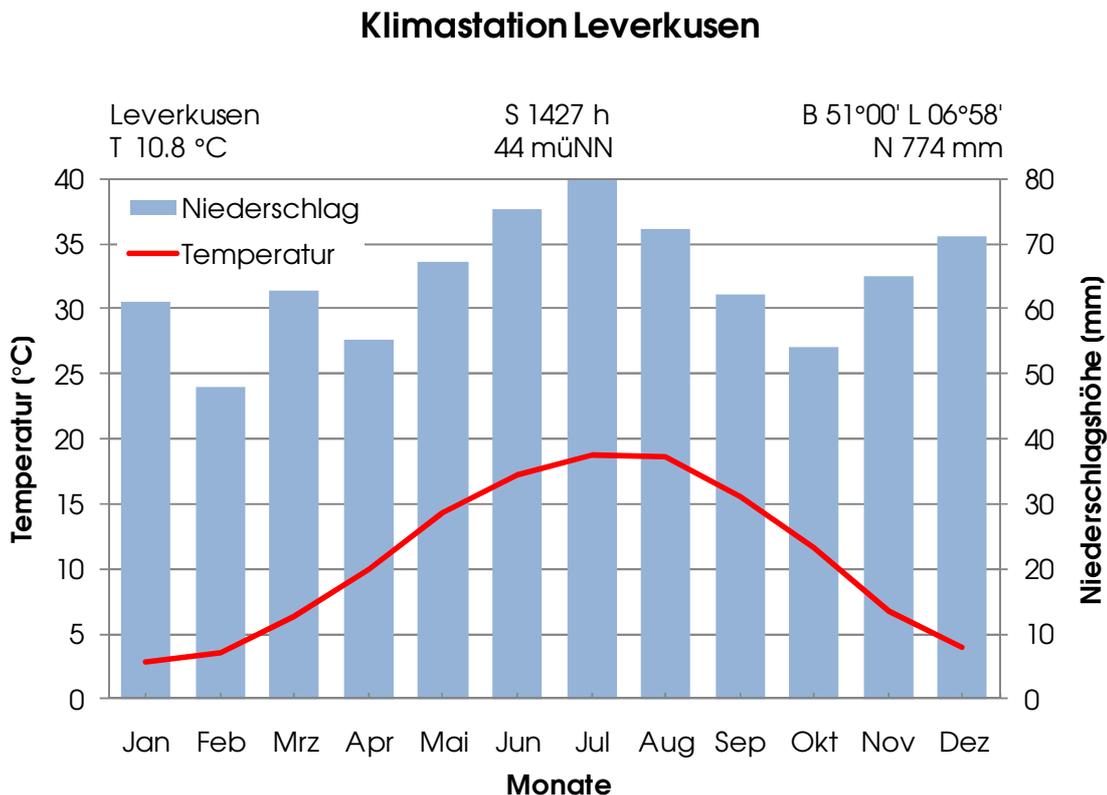


Abbildung 4.3: Walter-Lieth-Klimadiagramm⁹ der Klimastation Leverkusen der Zeitreihe 1961-1990, Datenquelle DWD (2010)

Für die Szenariensimulationen wurden drei Zeitreihen verwendet. Als Referenzperiode dienten die Kontrollläufe der Zeitreihe 1971-2000 (IST). Die Klimaperiode 2021-2050 wurde als „Nahe Zukunft“ mit „Z1“ bezeichnet und die dritte Zeitreihe umfasst das Ende des 21. Jahrhunderts von 2071-2100 und wurde als „Ferne Zukunft“ mit „Z2“ bezeichnet. Die einzelnen Graphiken sind in WETTREG- (W) und REMO- (R) Rechenläufe, nach Klimaszenarien als auch in Jahres- (J), Sommer- (S) und Winterabschnitte (W) unterteilt. Von den WETTREG-Szenarien wurde jeweils die feuchteste (f) als auch die trockenste (t) Realisation verwendet. Für dieses Testgebiet ergaben sich aus den Klimaberechnungen folgende hydrologische Auswirkungen:

⁹ Walter-Lieth-Klimadiagramm: Verläuft die Niederschlagskurve oberhalb der Temperaturkurve, spricht man von Humidität, im umgekehrten Fall von Aridität. Wenn die Monatssumme der Niederschläge [mm] doppelt so groß ist wie die Durchschnittstemperatur [°C] des entsprechenden Monats ($N = 2T$), wird die Grenze zwischen ariden und humiden Zuständen erreicht. Bei Walter-Lieth-Klimadiagrammen stehen daher die beiden Achsenmaßstäbe im Verhältnis 1:2, um eine sofortige Unterscheidung von ariden zu humiden Monaten zu ermöglichen.

MHQ

Für den mittleren Hochwasserabfluss werden sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft keine gravierenden Änderungen auftreten. Bei den meisten Szenarien besteht jedoch eine leichte Tendenz zur Abnahme von MHQ. Das A2 Szenario zeigt bei REMO signifikante Abweichungen gegenüber dem Kontrolllauf (Abbildung 4.4).

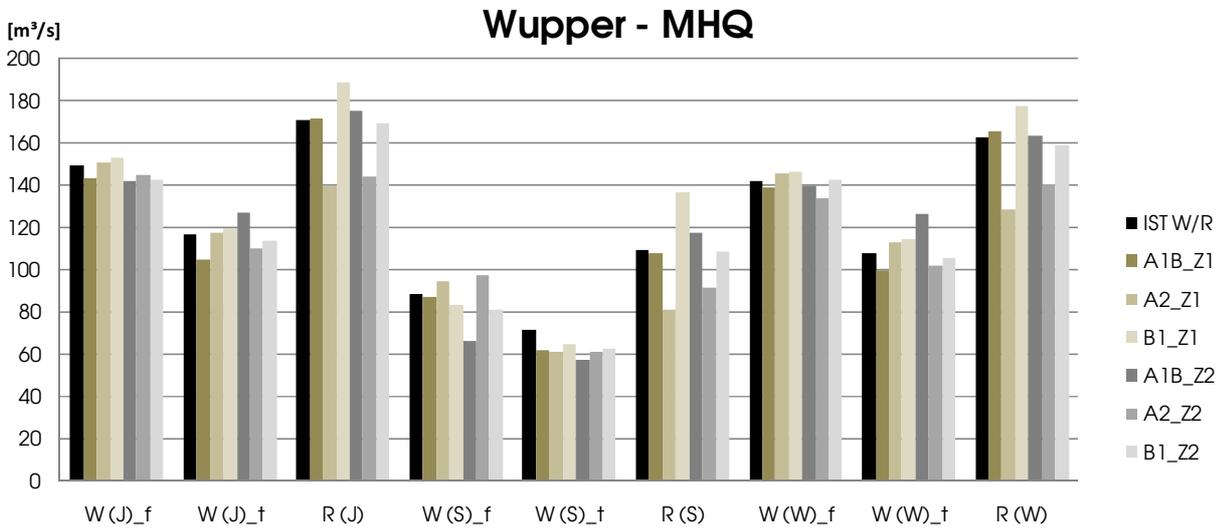


Abbildung 4.4: Hydrologische Belastung MHQ für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)

MQ

Die meisten Szenarien zeigen einen Rückgang von MQ im Sommerhalbjahr und eine Erhöhung im Winterhalbjahr. Im Jahresdurchschnitt sind alle WETTREG Szenarien relativ ausgeglichen. Hingegen weisen die REMO Rechenläufe speziell für das A2 Szenario sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft deutliche Abweichungen vom Kontrolllauf auf (Abbildung 4.5).

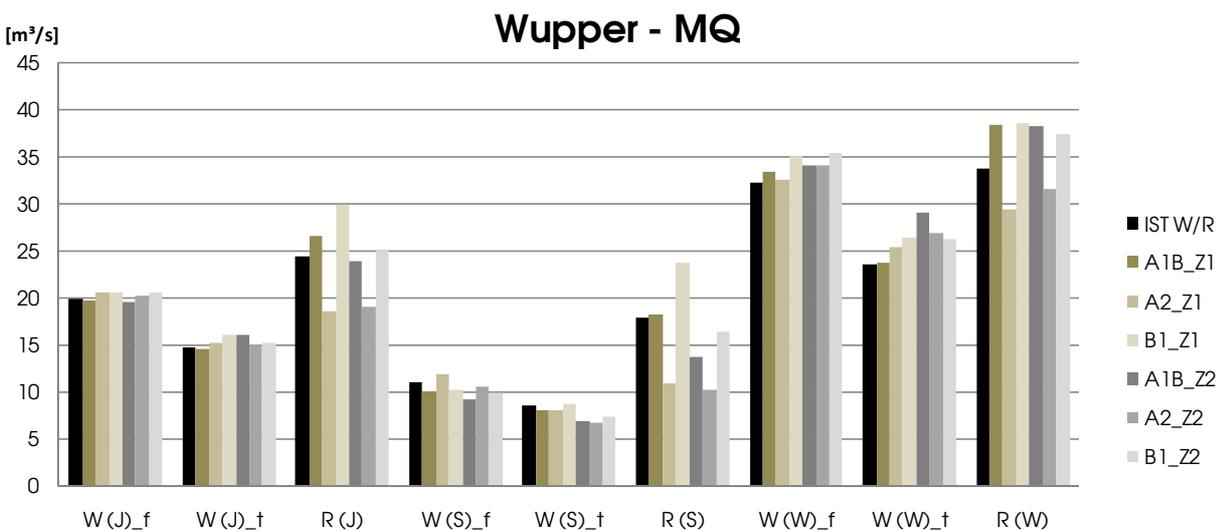


Abbildung 4.5: Hydrologische Belastung MQ für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)

MNQ

Alle WETTREG Berechnungen zeigen eine deutliche Zunahme des mittleren Niedrigwasserabflusses sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft, als auch im Sommer- und Winterhalbjahr. Aus REMO ergeben sich für die Wintermonate überwiegend deutliche Zunahmen (mit Ausnahme von A2). Dagegen sinkt der MNQ-Wert im Sommer und im Jahresdurchschnitt bei allen REMO Rechenläufen deutlich unter den Referenzzustand (Abbildung 4.6).

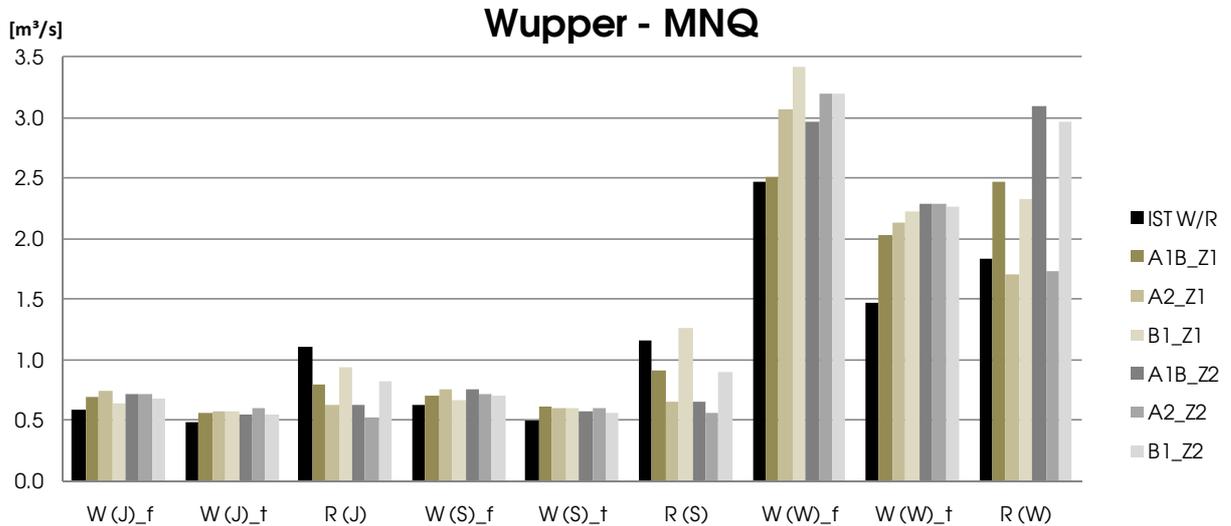


Abbildung 4.6: Hydrologische Belastung MNQ für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)

GWN

In der Grundwasserneubildungsrate ist sowohl bei WETTREG als auch bei REMO mit einer Abnahme im Sommerhalbjahr und einer Zunahme im Winterhalbjahr zu rechnen. Dieser Trend verstärkt sich noch in der fernen Zukunft. Im Jahresdurchschnitt zeigen die WETTREG Rechenläufe ein relativ einheitliches Bild, hingegen weisen die REMO Rechenläufe deutlichere Abweichungen gegenüber dem Kontrolllauf auf (Abbildung 4.7).

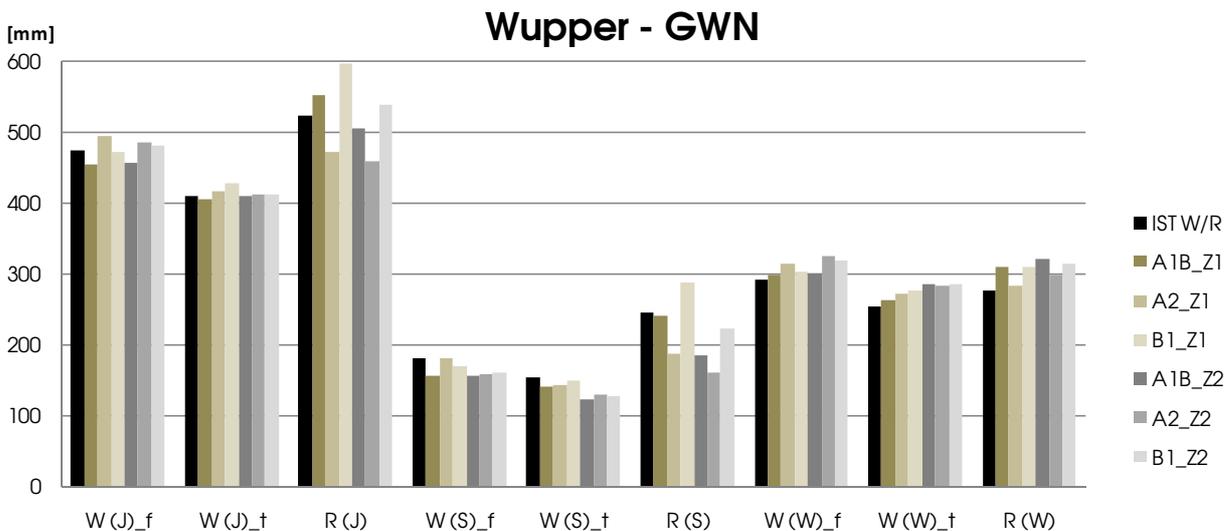


Abbildung 4.7: Hydrologische Belastung GWN für das EZG der Wupper (Gebietsauslass)

Im Vergleich von gemessenen zu berechneten Werten des Kontrolllaufs ergibt sich, dass die WETTREG Simulationen den Mess-Zustand deutlich besser wiedergeben können als die REMO Berechnung (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Vergleich der gemessenen hydrologischen Hauptwerte mit den berechneten Werten aus den Kontrollläufen der Regionalisierungsmodelle für das EZG der Wupper

	MHQ [m ³ /s]	MQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	GWN [mm]
Gemessen (Mess)	131,6	18,0	0,5	432
WETTREG (feucht)	149,3	19,9	0,6	475
WETTREG (trocken)	117,2	14,8	0,5	410
REMO	171,2	24,5	1,1	524

Fazit:

Insgesamt betrachtet zeigen die WETTREG Rechenläufe ein homogeneres Gesamtbild. Die REMO Rechenläufe weisen dagegen öfters signifikante Abweichungen vom Kontrolllauf auf. Hinzu kommt, dass das REMO A2 Szenario meist den restlichen REMO Berechnungen widerspricht. Tendenziell ist im EZG der Wupper mit etwas trockenen Sommern und feuchteren Wintern zu rechnen. Jedoch wird sich der MNQ Wert im Sommer eher etwas erhöhen.

4.4.3. Vorhandene Wassernutzungen

An der am 25.11.2008 stattgefundenen eintägigen Nutzerkonferenz in Wuppertal (Klärwerk Buchenhofen) erschienen 45 Vertreter der verschiedenen Wassernutzungen im Einzugsgebiet. Der Prototyp des Entscheidungsunterstützungssystems „WASKlim-EUS“ wurde vorgestellt und eine mögliche Anwendung im Einzugsgebiet der Wupper und Dhünn diskutiert. Im Nachgang der Nutzerkonferenz fanden mehrere persönliche Interviews mit Stakeholdern aus folgenden Bereichen statt:

Energieerzeugung:

- Wasserkraftanlagen
- Kühlwasserentnahmen und –einleitungen

Wasserversorgung

- Trinkwasserversorgung aus Talsperren
- Brauchwasserversorgung aus Talsperren

Gewässerzustand (wird als Wassernutzung interpretiert)

- Gewässerzustand aus biologischer Sicht (allgemein)
- Abwassereinleitungen aus Kläranlagen
- Fischerei (Ober-, Mittel- und Unterlauf)

Konkurrierende Nutzungsansprüche

- Konkurrierende Nutzungsansprüche der Talsperren in den Bereichen Hochwasserschutz und (Trink-)Wasserversorgung

4.4.4. Ergebnisse des WASKlim-EUS

Zustandsbewertung

Insgesamt konnten durch die Befragung Daten für acht verschiedene Wassernutzungen erhoben werden. Für die Bewertung des Zustandes wurden von den Stakeholdern jeweils hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen angegeben (Tabelle 4.2). Details zu der Bewertung sind im Anhang A.4.2 enthalten.

Tabelle 4.2: Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzer im EZG der Wupper

Wupper	Hydrologische Kenngrößen	Entwicklungs-Kenngrößen
Wasserkraftanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • MQ (J, S, W) • MNQ (S) • UZ<MNQ (S) 	
Kühlwasserentnahme/-einleitung	<ul style="list-style-type: none"> • MQ (S, W) • GWN (J) • W-Temp (S, W) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • L-Temp (S, W) • Ökon.Sw.
Trinkwasser aus Talsperren	<ul style="list-style-type: none"> • MHQ (J) • MQ (J) • L-Temp (S, W) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • L-Temp (S) • Ökon.Sw.
Brauchwasser aus Talsperren	<ul style="list-style-type: none"> • MQ (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • Ökon.Sw.
Gewässerzustand allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • MHQ (J) • MQ (J) • MNQ (J, S) • NNQ (J) • GWN (J) • L-Temp (S, W) 	
Abwassereinleitung aus Kläranlagen	<ul style="list-style-type: none"> • MNQ (S, W) • UZ<MNQ (S, W) • GWN (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • L-Temp (S) • Ökon.Sw.
Fischerei	<ul style="list-style-type: none"> • W-Temp (S, W) 	
Nutzungskonflikt HWS – TW aus TS	<ul style="list-style-type: none"> • MHQ (J, S, W) • HHQ (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • Ökon.Sw.

Werden beispielsweise bei den Entwicklungskenngrößen keine Angaben getätigt, wird die Bewertung des Wasserbedarfs automatisch als „zufriedenstellend (0)“ bewertet. Auf die Zustandsbewertung hat die Bewertung des Wasserbedarfs somit keinen Einfluss.

Nach der Eingabe der Daten in das WASKlim-EUS und der Berechnung der Ergebnisse unter Berücksichtigung von insgesamt neun Klimaszenarien ergab sich folgendes Bild für die Zustandsbewertung des Zeitraums 2021-2050 (Abbildung 4.8):

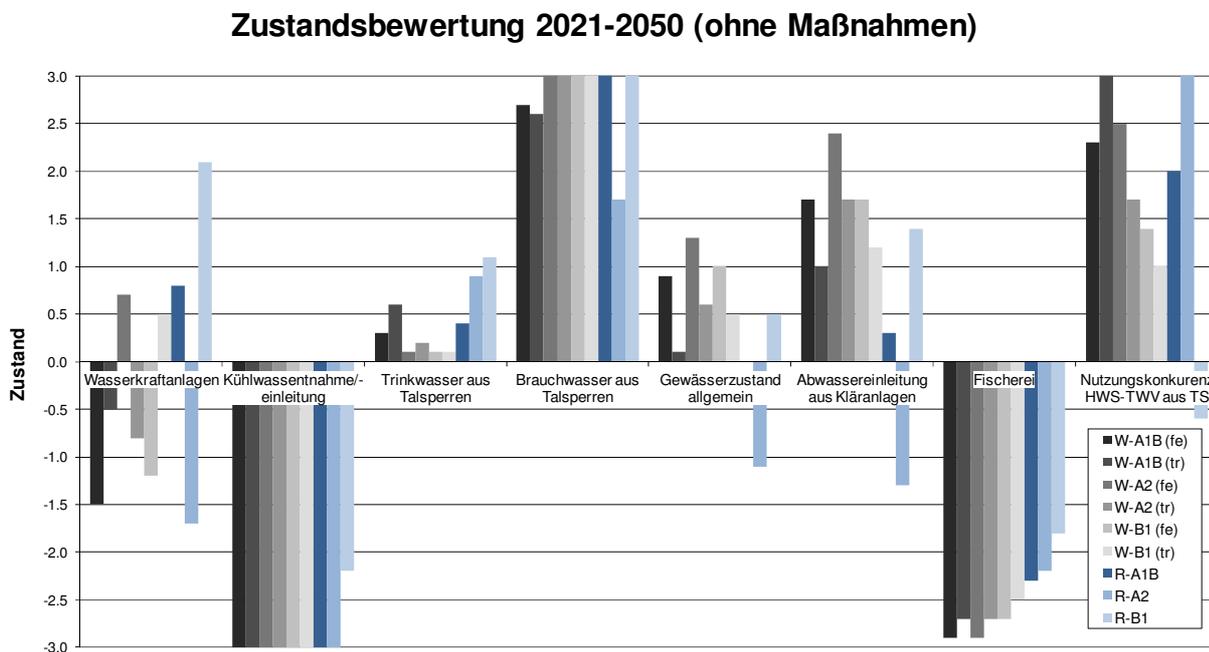


Abbildung 4.8: Zustandsbewertung Wupper 2021-2050 gegenüber 1971-2000

Jeder Balken stellt dabei ein anderes Klimaszenario dar. In der Legende stehen die Abkürzungen „W-“ für WETTREG und „R-“ für REMO. Die Bewertungsskala reicht von -3 als äußerst schlechten Zustand bis +3 als äußerst guten Zustand. Die Ergebnisse in den Bereichen Wasserkraftanlagen, Trinkwasserversorgung aus Talsperren und Gewässerzustand zeigen dabei ein teilweise kontroverses bzw. nicht eindeutiges Bild. Dagegen sind die Bereiche Kühlwasserentnahme und -einleitung (äußerst schlecht), Brauchwasserversorgung aus Talsperren (gut bis äußerst gut), Fischerei (sehr schlecht bis äußerst schlecht) und die Nutzungskonkurrenz aus Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung (gut) eindeutig. Der Bereich Abwassereinleitungen aus Kläranlagen zeigt zwar einen Trend, kommt aber nicht deutlich über den guten Zustand hinaus.

In Zeitraum 2071-2100 ist der Trend für einige Wassernutzungen deutlicher (Abbildung 4.9). Alle Klimaszenarien zeigen nun für Wasserkraftanlagen einen schlechten Zustand auf. Auch wird der Gewässerzustand klarer abgebildet. Dieser liegt zwischen zufriedenstellend und gut (WETTREG).

Zustandsbewertung 2071-2100 (ohne Maßnahmen)

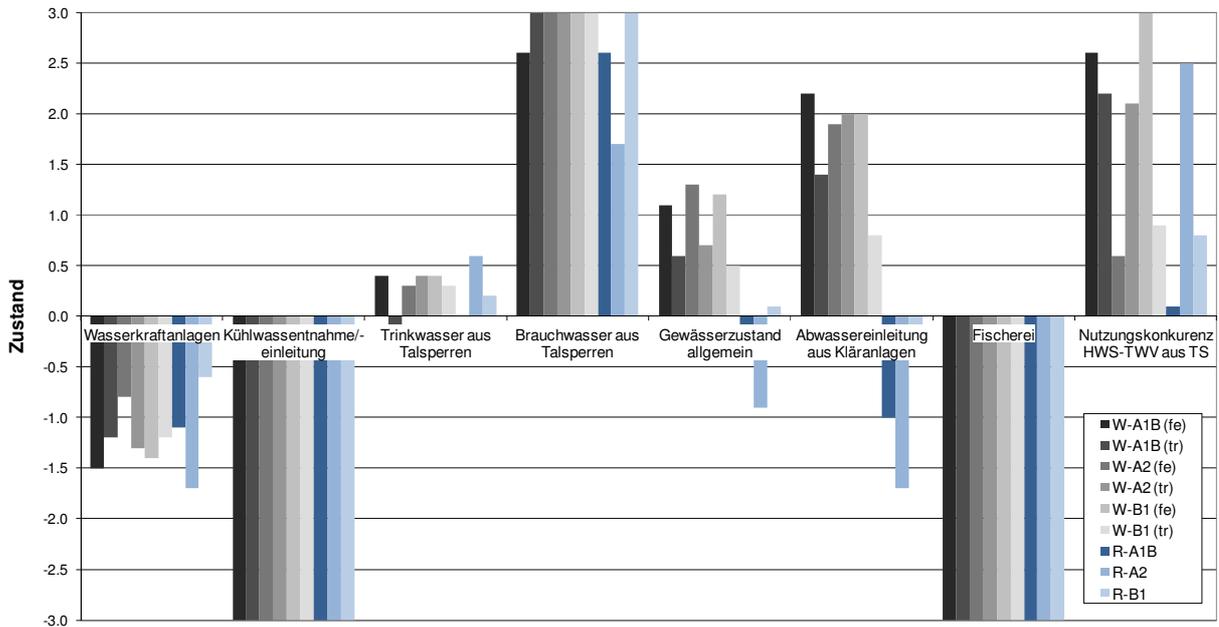


Abbildung 4.9: Zustandsbewertung Wupper 2071-2100 gegenüber 1971-2000

In Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Die Steigung der Pfeile ist dabei ein Maß für die Ausprägung des Zustandes. Vulnerable Wassernutzungen im Einzugsgebiet der Wupper sind demnach Wasserkraftanlagen, Kühlwasserentnahmen und –einleitungen sowie die Fischerei. Bei den Nutzungen Gewässerzustand und Abwassereinleitungen zeigen die REMO Ergebnisse entgegen den WETTREG Ergebnissen eine überwiegend negative Entwicklung voraus. Da die Eintrittswahrscheinlichkeit der Klimaszenarien für alle Szenarien gleich groß ist, ist der Trend nicht eindeutig.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung Zustandsbewertung Wupper - Mittelwerte (roter Pfeil = negative Zustandsentwicklung, grüner Pfeil = positive Zustandsentwicklung, horizontal = unklare Zustandsentwicklung)

Wassernutzung	2021-2050	2071-2100
Wasserkraftanlagen	↔	↘
Kühlwasserentnahmen/-einleitungen	↓	↓
Trinkwasserversorgung aus Talsperren	↗	↗
Brauchwasserversorgung aus Talsperren	↑	↑
Gewässerzustand allgemein	↔	↗
Abwassereinleitung aus Kläranlagen	↗	↗
Fischerei	↓	↓
Nutzungskonkurrenz HWS-TWV	↗	↗

Im EZG der Wupper sind 8 Trinkwasser- und 8 Brauchwassertalsperren vorhanden. Da somit die Wasserspeichermöglichkeiten enorm sind, werden für diese Wassernutzungen (Brauch- und Trinkwasserversorgung) zukünftig auch keine Zustandsverschlechterungen aufgrund des

Diese Ergebnisse in Tabelle 4.4 werden nun mit den Ergebnissen der Zustandsbewertung verglichen. Als vulnerabel wurden die Nutzungen Wasserkraftanlagen, Kühlwasserentnahmen und –einleitungen sowie die Fischerei ermittelt, so dass Maßnahmen aus diesen Bereichen bevorzugt werden sollten. Demnach ist die Maßnahme „Gewässerschutz (oberirdisch)“ zu priorisieren, da sie mit einer Bewertung von 1,85 die größte Punktezahl erreicht hat. Vulnerabel Wassernutzungen sind in der Tabelle 4.4 markiert (fett).

4.4.5. Unsicherheiten

Da die Ergebnisse sehr stark von den Stakeholdereinschätzungen abhängen, welche überwiegend subjektiver Natur sind, ist die ebenfalls abgefragte Selbsteinschätzung der Stakeholder bezüglich der Beantwortung der Fragen von großer Bedeutung (Tabelle 4.5). Insgesamt gab es drei Bewertungsstufen, von unsicher (1) über ziemlich sicher (2) bis sicher (3). Zwei Vertreter von Wassernutzungen haben hierzu keine Angaben getätigt, daher sind diese Spalten nicht ausgefüllt. Betrachtet man den jeweiligen Mittelwert, so liegen alle Selbsteinschätzungen zwischen „ziemlich sicher“ und „sicher“. Nur wenige Fragen wurden mit „unsicher“ bewertet. Daraus kann man schließen, dass die Unsicherheiten bei der Beantwortung relativ gering sind.

Tabelle 4.5: Selbsteinschätzung der Stakeholder im Einzugsgebiet der Wupper. Dazugehörige Fragen siehe Anhang A.3. (unsicher (1), ziemlich sicher (2) und sicher (3))

Frage (Kurzform)	Wasserkraftanlagen [1-3]	Kühlwasserentnahmen/- einleitungen [1-3]	Trinkwasser aus Talsperren [1-3]	Brauchwasser aus Talsperren [1-3]	Gewässerzustand allgemein [1-3]	Abwasserinleitung aus Kläranlagen [1-3]	Fischerei [1-3]	Nutzungskonkurrenz HWS – TWV aus TS [1-3]
1. Wassernutzungen im EZG	3	2	2	3	-	2	-	2
2. Wasserdargebot Kenngrößen	2	2	2	3	-	2	-	2
3. Wasserdargebot Bewertung	2	2	3	3	-	1	-	2
4. Wasserdargebot Gewichtung	3	1	3	3	-	2	-	2
5. Wasserbedarf Kenngrößen	-	1	2	3	-	2	-	2
6. Wasserbedarf Bewertung	-	2	3	3	-	3	-	2
7. Wasserbedarf Gewichtung	3	2	3	3	-	2	-	2
8. Maßnahmen Benennung	2	2	2	-	-	2,5	-	2
9. Maßnahmen Bewertung	3	3	3	-	-	3	-	2
10. Maßnahmen Gewichtung	2	3	3	-	-	3	-	2
11. Maßnahmen verbale Bewertung	2	3	3	-	-	-	-	2
Mittelwert	2,4	2,1	2,6	3,0	-	2,3	-	2,0

4.5 Testregion Salza

4.5.1. Beschreibung des Einzugsgebietes

Das Einzugsgebiet der Salza hat eine Fläche von 621 km². Die potenzielle Verdunstung beträgt jährlich ca. 565 mm (STAU 1999) und ist i.d.R. größer als der Niederschlag, so dass sich im langjährigen Mittel eine negative klimatische Wasserbilanz einstellt. Begrenzt wird das Einzugsgebiet der Salza im Westen durch die Ostausläufer des Harz und der Stadt Halle im Osten. Die Salza mündet bei Salzmünde wenige Kilometer unterhalb von Halle in die Saale und bildet sich aus dem südlichen Weida- und dem nördlichen Böse Sieben Einzugsgebiet (Abbildung 4.10). Das Gebiet der Salza mit den zugehörigen Mansfelder Seen wurde seit dem 17. Jahrhundert durch Tief- und Tagebau intensiv bergbaulich genutzt. Der Tagebau Amsdorf (Kohle) ist der letzte noch fördernde Tagebau im Einzugsgebiet der Salza. Durch die bergbauliche Tätigkeit wurde der Wasserhaushalt der Salza in vielerlei Hinsicht stark beeinflusst (WEIB 2000; KLAPPER 2000; JULICH & FRÜHAUF 2007). Für den Tiefbergbau wurden Förderanlagen installiert, die das einsickernde Grubenwasser herauspumpen.

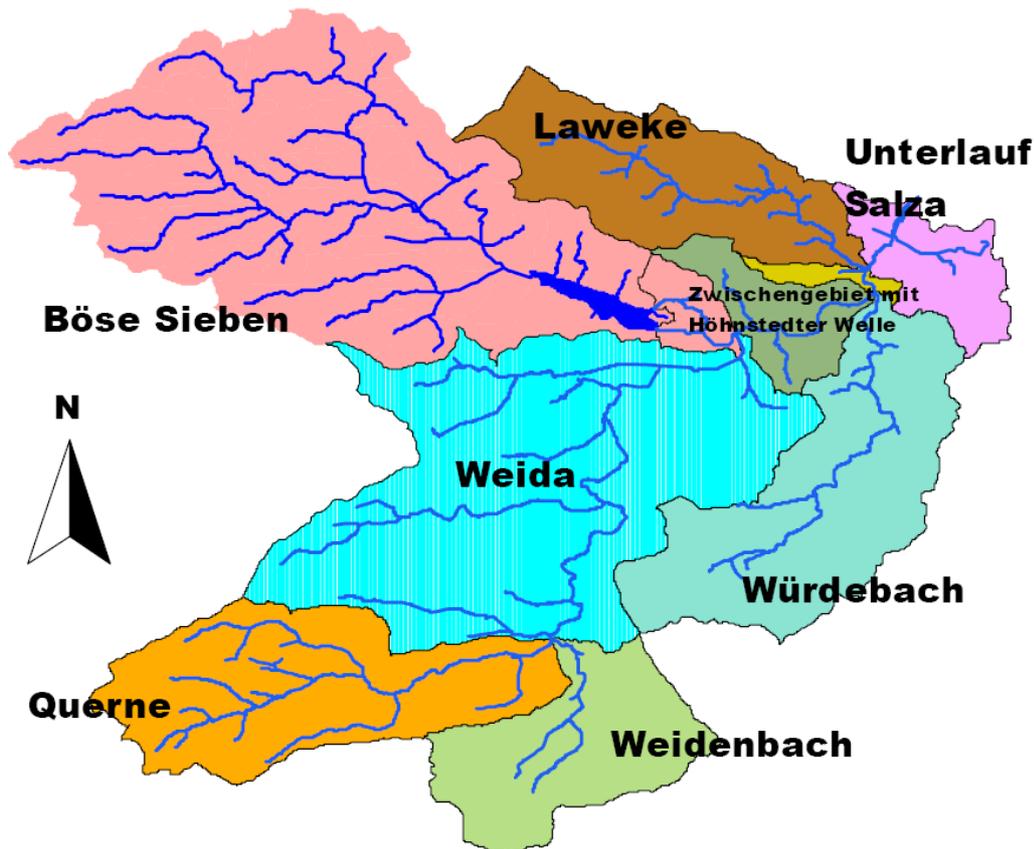


Abbildung 4.10: Einzugsgebiet Salza (BAH BERLIN 2009)

In Abbildung 4.11 ist die derzeitige Situation im Bereich des süßen und des ehemaligen salzigen Sees dargestellt. Vom ehemaligen salzigen See sind nur noch verschiedene kleinere Seen zurückgeblieben. In diesem Gebiet treffen das nördliche Böse Sieben Einzugsgebiet mit dem aus südlicher Richtung kommenden Weida Einzugsgebiet zusammen. Zwischen Hohnstedt

und Wansleben befindet sich das Pumpwerk, das das Wasser aus dem Mittelgraben in die Salza befördert. Das Einzugsgebiet der Salza zeichnet sich u.a. durch die Charakterisierung als Trockengebiet mit sommerlicher Waldbrandgefahr und intensiver landwirtschaftlicher Nutzung als ein Gebiet mit einem hohen Potenzial für Nutzungskonflikte aus. Die Vulnerabilität des Wassersektors ist nach ZEBISCH et al. (2005) als hoch einzustufen.

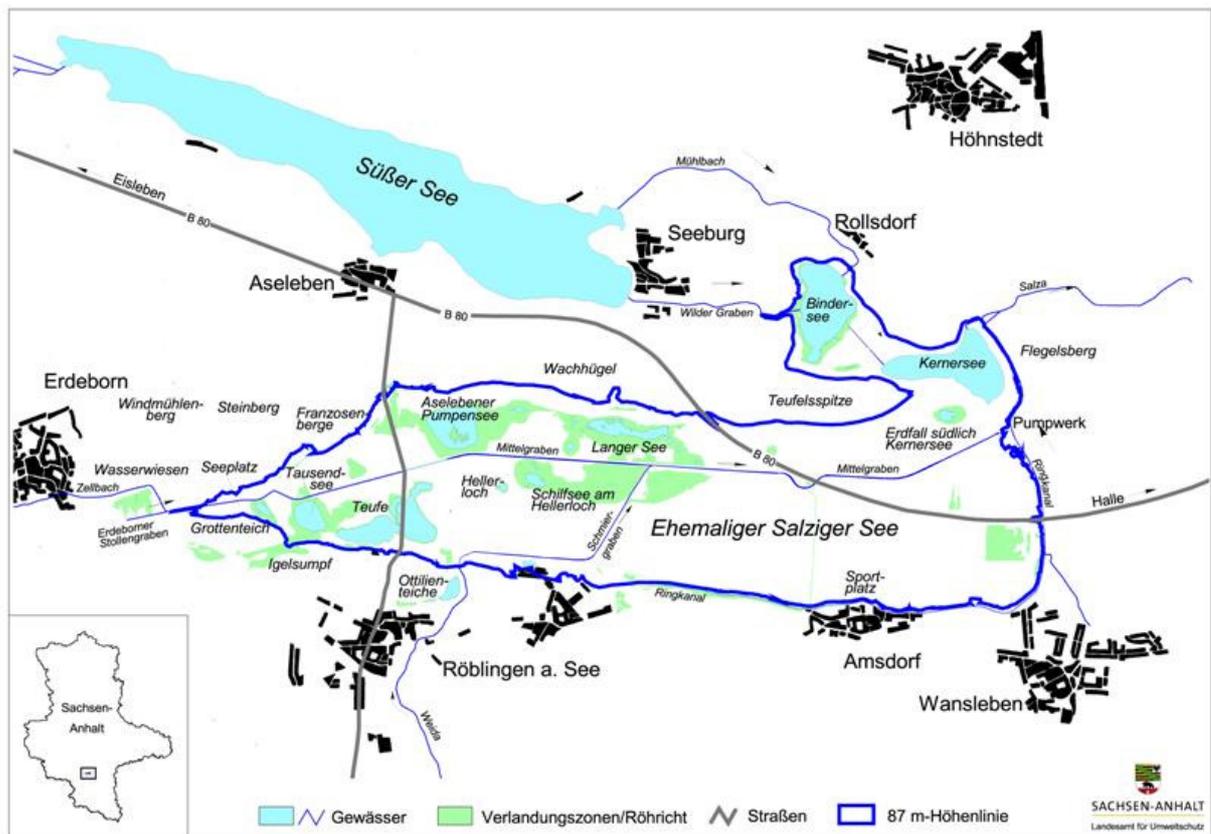


Abbildung 4.11: Bereich süßer See und ehemaliger salziger See (EVSA 2009)

4.5.2. Hydrologische Belastung

Im EZG der Salza herrscht ein humides Klima (Abbildung 4.12). An der Klimastation Halle-Kroellwitz (Nähe Gebietsauslass) beträgt der jährliche Niederschlag 451 mm bei einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 9,1 °C und 1404 Stunden Sonnenscheindauer im Jahr. In der Zeitreihe 1971-2000 betragen die hydrologischen Hauptwerte der Wupper 8,4 m³/s für MHQ, 1,0 m³/s für MQ und 0,4 m³/s für MNQ. Die GWN betrug 33,8 mm.

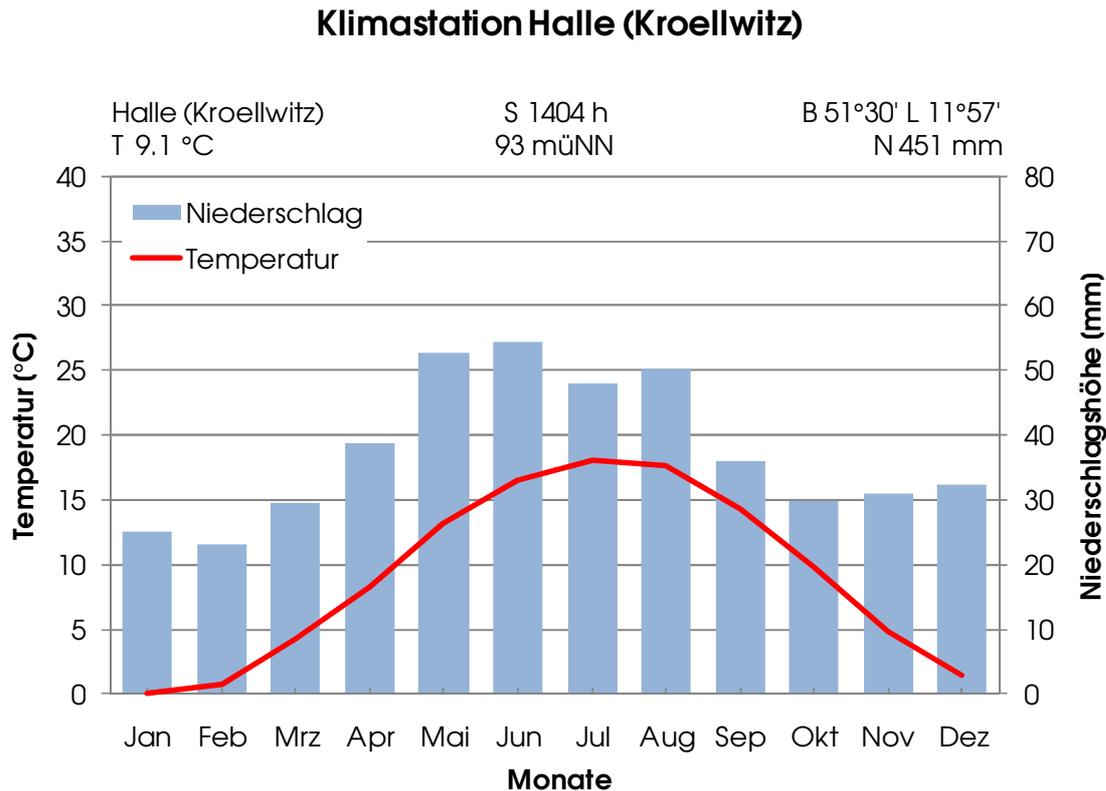


Abbildung 4.12: Walter-Lieth-Klimadiagramm¹⁰ der Klimastation Halle (Kroellwitz) der Zeitreihe 1961-1990 , Datenquelle DWD (2010)

Für dieses Testgebiet ergaben sich aus den Klimaberechnungen folgende hydrologische Auswirkungen¹¹:

MHQ

Die WETTREG Szenarien zeigen überwiegend einen Rückgang des mittleren jährlichen Hochwasserabflusses. Dieser Trend verstärkt sich in der fernen Zukunft und prägt sich sowohl auf die Sommer-, als auch auf die Winterhalbjahre durch. Die REMO Rechenläufe zeigen ein ziemlich kontroverses Bild mit signifikanten Änderungen. Speziell das A2 Szenario, welches eine Reduktion von MHQ zeigt, steht im Gegensatz zu den restlichen REMO Rechenläufen (Abbildung 4.13).

¹⁰ Erläuterungen zum Walter-Lieth-Klimadiagramm, siehe Kapitel 4.4.2

¹¹ Erläuterungen zu den Graphiken, siehe Kapitel 4.4.2.

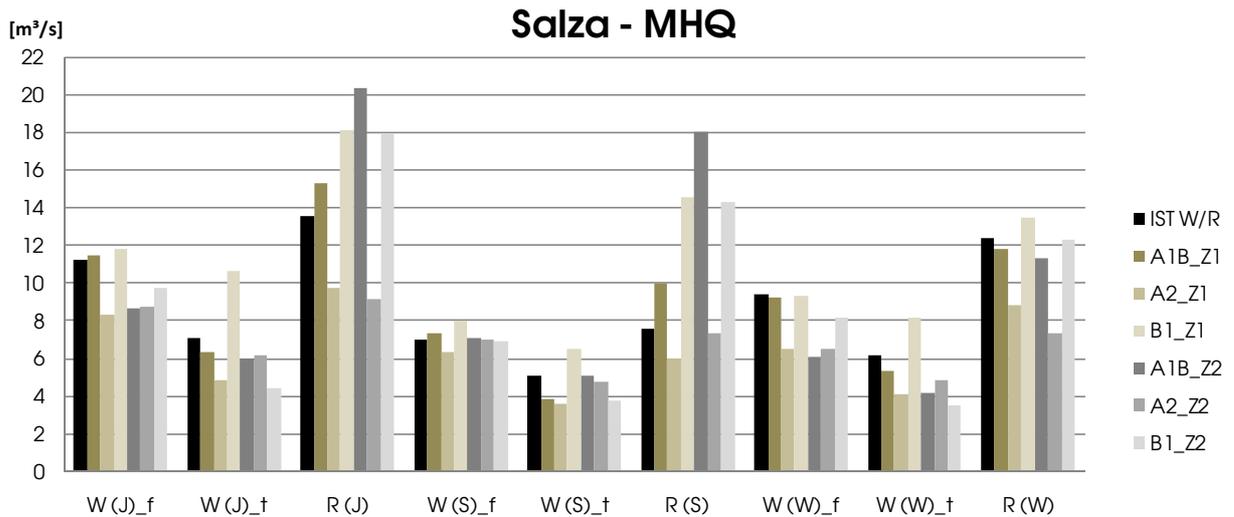


Abbildung 4.13: Hydrologische Belastung MHQ für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)

MQ

WETTREG zeigt in der nahen und in der fernen Zukunft überwiegend einen Rückgang des mittleren jährlichen Mittelwasserabflusses. Sowohl im Sommer als auch im Winter weisen die WETTREG Berechnungen einen Rückgang auf. Hingegen zeigt sich bei den REMO Rechenläufen ein kontroverses Bild mit signifikanten Änderungen. Das REMO A2 Szenario zeigt einen deutlichen Rückgang in allen Berechnungen, hingegen weisen die restlichen REMO Berechnungen eine deutliche Erhöhung auf (Abbildung 4.14).

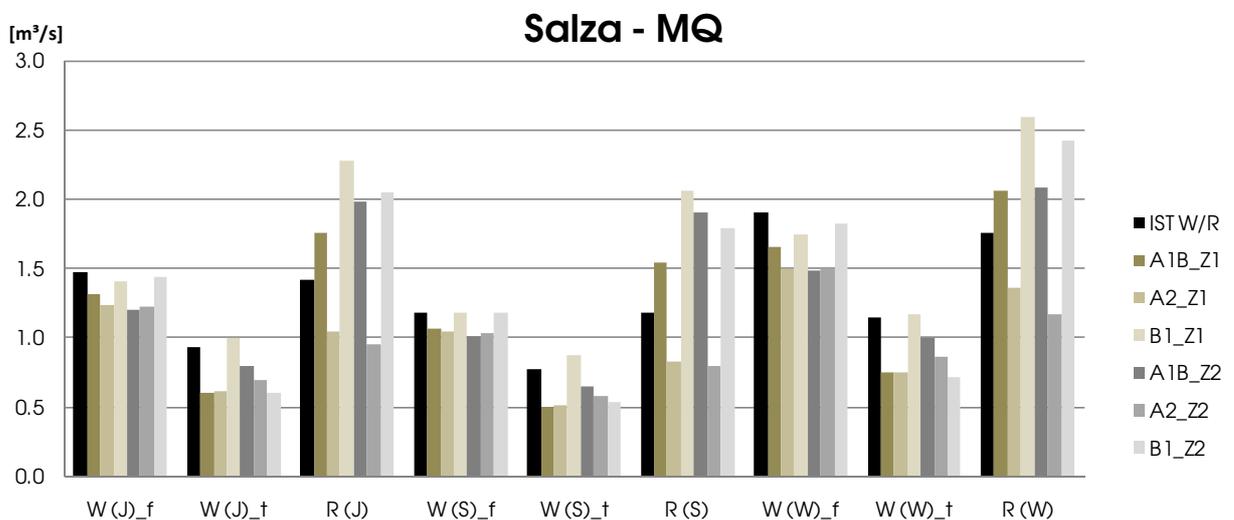


Abbildung 4.14: Hydrologische Belastung MQ für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)

MNQ

In allen WETTREG Szenarien ist ein Rückgang der MNQ-Werte sowohl im Jahresdurchschnitt als auch im Sommer- und Winterhalbjahr zu erkennen. Bei den trockenen WETTREG Szenarien ist dies noch deutlicher ausgeprägt als bei den feuchten. Bei den REMO Rechenläufen zeichnet sich in der nahen als auch in der fernen Zukunft eine teilweise signifikante Erhöhung von MNQ ab. Eine Ausnahme stellt hier wiederum das REMO A2 Szenario dar, wel-

ches einen deutlichen Rückgang von MNQ sowohl im Jahresgang als auch im Sommer- und Winterhalbjahr zeigt (Abbildung 4.15).

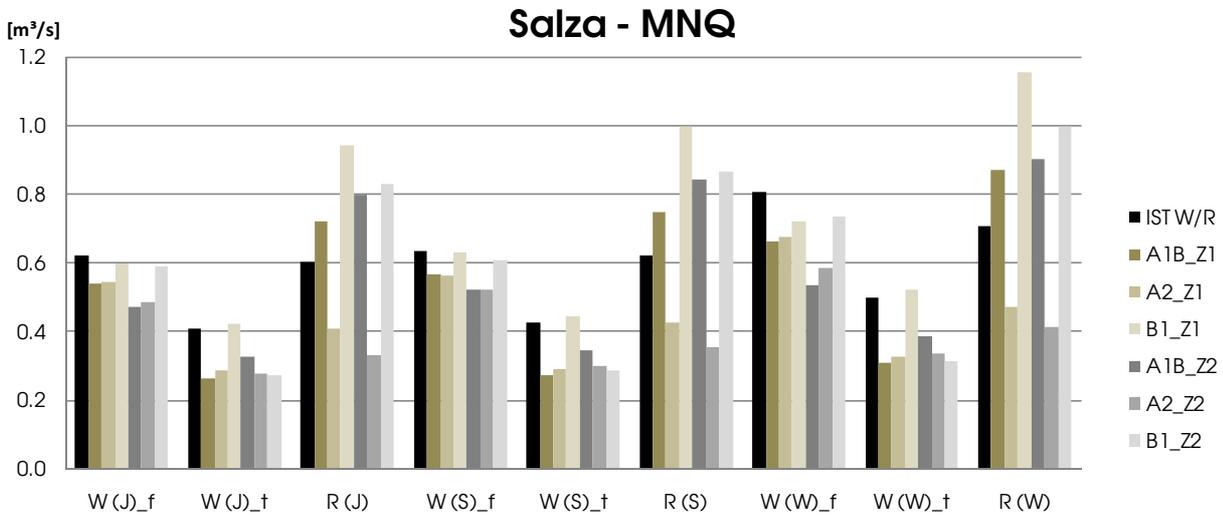


Abbildung 4.15: Hydrologische Belastung MNQ für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)

GWN

Die feuchten und die trockenen WETTREG Simulationen zeigen im Sommerhalbjahr eine negative GWN die sich teilweise in der fernen Zukunft noch verstärkt. Im Jahresdurchschnitt ist bei den feuchten WETTREG Szenarien mit einem moderaten Rückgang und bei den trockenen Szenarien mit einem teilweise signifikanten Rückgang zu rechnen. Bei den REMO Rechenläufen zeigt sich eine deutliche Erhöhung im Sommer- und Winterhalbjahr. Hierzu im Widerspruch steht erneut das REMO A2 Szenario (Abbildung 4.16).

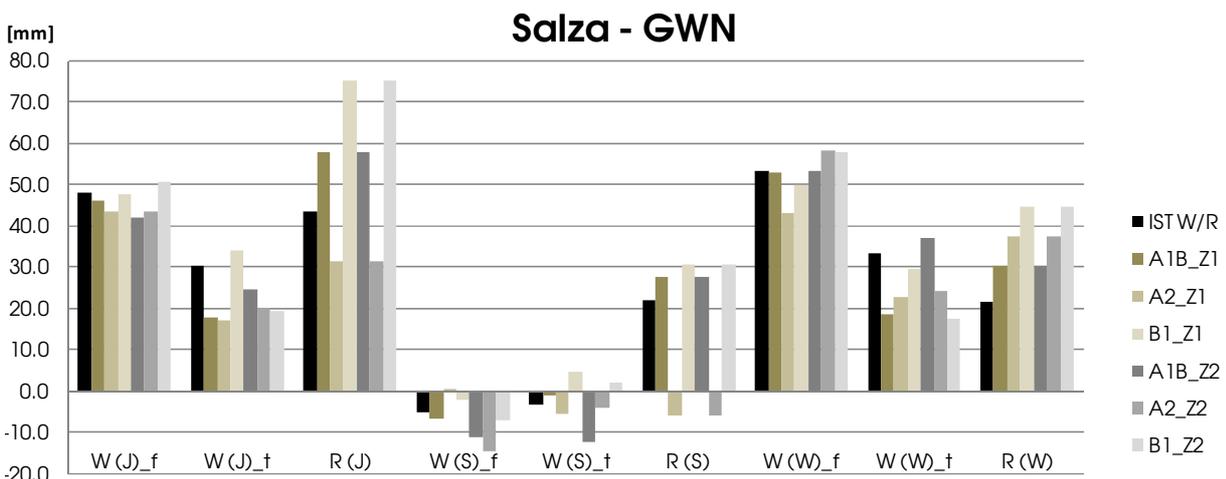


Abbildung 4.16: Hydrologische Belastung GWN für das EZG der Salza (Pegel Zappendorf)

Im Vergleich von gemessenen zu berechneten Werten des Kontrolllaufs ergibt sich, dass die trockene WETTREG Realisation den Mess-Zustand am besten abbildet. Die Abweichungen von WETTREG feucht und REMO befinden sich beide auf einem ähnlichen Niveau (Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Vergleich der gemessenen hydrologischen Hauptwerte mit den berechneten Werten aus den Kontrollläufen der Regionalisierungsmodelle für das EZG der Salza

	MHQ [m ³ /s]	MQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	GWN [mm]
Gemessen (Mess)	8,4	1,0	0,4	34
WETTREG (feucht)	11,2	1,5	0,6	48
WETTREG (trocken)	7,1	0,9	0,4	30
REMO	13,6	1,4	0,6	43

Fazit:

Insgesamt betrachtet zeigen auch hier die WETTREG Rechenläufe ein homogeneres Gesamtbild. Die REMO Rechenläufe weisen dagegen öfters signifikante Abweichungen vom Kontrolllauf auf. Hinzu kommt, dass das REMO A2 Szenario meist den restlichen REMO Berechnungen widerspricht und dem Trend der WETTREG Berechnungen folgt. Tendenziell ist im EZG der Salza nach den WETTREG Simulationen mit trockenen Sommern und trockenen Wintern zu rechnen. Die REMO Berechnungen zeigen ein eher kontroverses Bild mit Ausprägungen in beide Richtungen.

4.5.3. Vorhandene Wassernutzungen

An der Nutzerkonferenz in Halle/Saale (16.03.2009, Landesverwaltungsamt) nahmen 37 Vertreter verschiedener, im Einzugsgebiet vorkommender, Wassernutzungen teil. Der Prototyp des Entscheidungsunterstützungssystems „WASKlim-EUS“ wurde auch hier vorgestellt und eine mögliche Anwendung im Einzugsgebiet der Salza diskutiert. Schon während der Konferenz wurde deutlich, dass die Bereitschaft zur Mitwirkung der Stakeholder aufgrund der Komplexität des Einzugsgebietes begrenzt ist. Gerade aufgrund der vielschichtigen Zusammenhänge durch den ehemaligen Tagebau und den damit verbundenen salzigen See sind Aussagen zu möglichen Folgen des Klimawandels sehr schwierig. Zudem wird der größte Teil der Wasserversorgung durch die benachbarte Rappbode-Talsperre gedeckt, die sich nicht im Einzugsgebiet der Salza befindet. Fragebögen aus den Bereichen Trinkwasser- und Brauchwasserversorgung aus Grundwasser- und Oberflächenwasser, Abwassereinleitungen aus Kläranlagen sowie Abwassereinleitungen aus Industrie (Oberflächen- und Produktionsabwässer) konnten im WASKlim-EUS berücksichtigt werden. Diese Daten stammen alle aus dem südlichen Einzugsgebiet der Weida. Zum Gewässerzustand konnten keine weiteren Daten erhoben werden. Daher wurden für diese Wassernutzung vom Verfasser Kenngrößen und Schwellenwerte festgelegt, die sich an den Ergebnissen des Wuppertestgebietes orientieren.

Für folgende Wassernutzungen konnten Daten erhoben werden:

Wasserversorgung

- Trinkwasserversorgung aus Grundwasser (Weida)
- Brauchwasserversorgung aus Grundwasser (Weida)
- Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser (Weida)

Gewässerzustand (wird als Wassernutzung interpretiert)

- Gewässerzustand aus biologischer Sicht (allgemein)
- Abwassereinleitung aus Kläranlagen (Weida)
- Abwassereinleitung aus Trennsystem (Amsdorf)

4.5.4. Ergebnisse des WASKlim-EUS

Zustandsbewertung

Insgesamt konnten durch die Befragung und durch eigene Ermittlungen Daten für sechs verschiedene Wassernutzungen erhoben werden (Tabelle 4.7). Für die Bewertung des Gewässerzustandes wurden Indikatoren aus Erfahrungen vom Einzugsgebiet der Wupper übertragen. Folgende hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen wurden für die Zustandsbewertung verwendet. Details zu den Bewertungen sind im Anhang A.4.3. enthalten.

Tabelle 4.7: Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzer im EZG der Salza (Weida)

Salza / Weida	Hydrologische Kenngrößen	Entwicklungskenngrößen
Trinkwasser aus GW	<ul style="list-style-type: none"> • MHQ (J) • MQ (J) • MNQ (J) • GWN (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • Ökon.Sw.
Brauchwasser aus GW	<ul style="list-style-type: none"> • MHQ (J) • MQ (J) • MNQ (J) • GWN (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökon.Sw.
Brauchwasser aus Oberflächenwasser	<ul style="list-style-type: none"> • MQ (J) • MNQ (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökon.Sw.
Abwassereinleitung aus Kläranlagen	<ul style="list-style-type: none"> • MQ (J) • MNQ (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bev.Entw. • Ökon.Sw.
Abwassereinleitung aus Trennsystemen	<ul style="list-style-type: none"> • MHQ (J) • HHQ (J) 	
Gewässerzustand allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • MQ (J) • MNQ (S, W) • UZ<MNQ (S, W) • GWN (J) 	<ul style="list-style-type: none"> • L-Temp (S)

Nach der Eingabe der Daten in das WASKlim-EUS und der Berechnung der Ergebnisse unter Berücksichtigung von insgesamt neun Klimaszenarien ergab sich folgendes Bild für die Zustandsbewertung der Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 gegenüber 1971-2000 (Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18). Erläuterung zur Graphik siehe Kapitel 4.4.4.

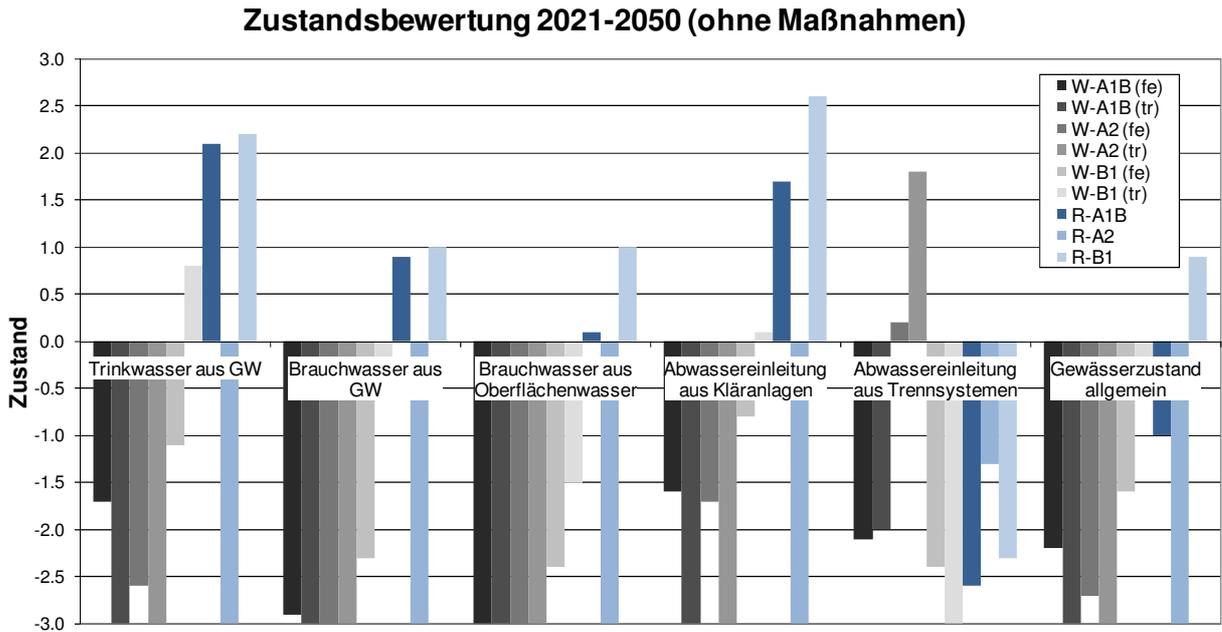


Abbildung 4.17: Zustandsbewertung Salza 2021-2050 gegenüber 1971-2000

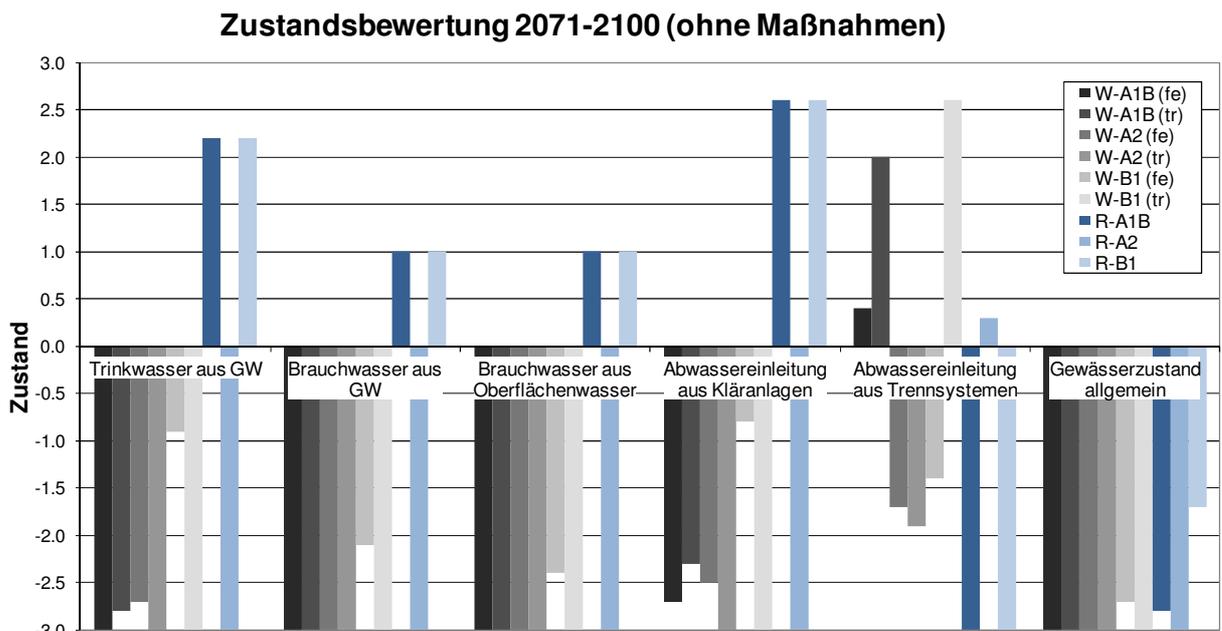


Abbildung 4.18: Zustandsbewertung Salza 2071-2100 gegenüber 1971-2000

Die Ergebnisse der sechs betrachteten Wassernutzungen aus dem Einzugsgebiet der Weida zeigen in Abhängigkeit vom betrachteten Klimaszenario ein relativ kontroverses Bild. Auffällig ist, dass die Szenarien REMO A1B und REMO B1 den restlichen Klimaprojektionen widersprechen, was sich auf die hydrologischen Kenngrößen durchprägt. Beispielsweise zeigt die Kenngröße MQ (J) eine negative Entwicklung in den meisten Szenarien (Tabelle 4.8). Das heißt, prozentual gesehen wird sich der Mittelwasserabfluss MQ (J) gegenüber dem heutigen Zustand wahrscheinlich reduzieren (< 100%). Die beiden REMO Projektionen sagen hierzu jedoch eine positive Entwicklung voraus (> 100%, fett markiert). Da diese Kenngröße für die Bewertung von fast allen Wassernutzungen verwendet wurde und die Gewichtungen relativ

hoch waren, ist der Einfluss sehr groß. Dadurch können die unterschiedlichen Ergebnisse in der WASKlim-EUS Auswertung begründet werden.

Tabelle 4.8: Prozentuale Änderung der hydrologischen Kenngröße MQ (J) in naher (Z 1: 2021-2050) und ferner Zukunft (Z 2: 2071-2100) zu IST (1971-2000)

	W_A1B_f	W_A1B_t	W_A2_f	W_A2_t	W_B1_f	W_B1_t	R_A1B	R_A2	R_B1
MQ (J), Z 1 [%]	88,9	64,9	83,4	65,5	95,5	107,0	123,6	73,9	160,9
MQ (J), Z 2 [%]	81,5	85,4	82,8	74,6	97,8	64,9	139,6	66,9	144,7

Vulnerable Wassernutzungen im Einzugsgebiet der Weida sind demnach alle betrachteten Nutzungen (Tabelle 4.9). Da aber auch hier die Eintrittswahrscheinlichkeit der Klimaszenarien für alle Szenarien gleich groß ist, ist der Trend aufgrund zweier REMO Projektionen nicht eindeutig.

Tabelle 4.9: Zusammenfassung Zustandsbewertung Salza - Mittelwerte (roter Pfeil = negative Zustandsentwicklung, grüner Pfeil = positive Zustandsentwicklung, horizontal = unklare Zustandsentwicklung)

Wassernutzung	2021-2050	2071-2100
Trinkwasserversorgung aus Grundwasser		
Brauchwasserversorgung aus Grundwasser		
Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser		
Abwassereinleitungen aus Kläranlagen		
Abwassereinleitungen aus Trennsystemen		
Gewässerzustand allgemein		

Begründet kann dieses Ergebnis damit werden, dass das EZG der Salza bereits heute eine negative klimatische Wasserbilanz aufweist. Das heißt, die durchschnittliche Verdunstung ist höher als der Niederschlag, der im gleichen Zeitraum fällt. Zukünftig wird dieses Verhältnis von Verdunstung zu Niederschlag aufgrund des Klimawandels noch schlechter ausfallen. Da bereits heute im EZG der Salza nicht genügend Niederschlag für die Wasserversorgung vorhanden ist, wird aus der im benachbarten EZG vorhandenen Rappbode-Talsperre Wasser übergeleitet. Daher weisen alle betrachteten Wassernutzungen eine negative Zustandsentwicklung auf.

Maßnahmenbewertung

Folgende Tabelle 4.10 zeigt die verschiedenen Maßnahmen, die durch die Expertenbefragung erhoben wurden. Die Gewichtung der einzelnen Wassernutzungen wurde vom Verfasser durchgeführt und ist rein hypothetisch. Die Spalte „Bewertung“ gibt an, welche Maßnahme die beste Bewertung unter Berücksichtigung der Gewichtung aufzeigt. Die Bewertungsskala reicht von äußerst ungeeignet (-3) bis äußerst geeignet (+3). Die Maßnahme „Fernwassernetz ausbauen“ wurde am höchsten mit 0,75 Punkten bewertet und sollte daher priorisiert werden. Für den „Gewässerzustand allgemein“ wurden keine Anpassungsmaßnahmen angegeben.

Tabelle 4.10: Maßnahmenbewertung im EZG der Weida (fett = vulnerabel)

	Bewertung	Trinkwasser aus Grundwasser	Brauchwasser aus Grundwasser	Brauchwasser aus Oberflächenwasser	Abwassereinleitung aus Kläranlagen	Abwassereinleitung aus Trennsystemen	Gewässerzustand allgemein
Anpassungsmaßnahmen	[-3;+3]	44%	6%	3%	6%	6%	34%
Fernwassernetz ausbauen	0,75	1,7					
Fixierung des Restwasserabflusses	0,25		1,6	1,6	1,6		
Gewässerausbau	0,06					1,0	

4.5.5. Unsicherheiten

Tabelle 4.11 gibt Aufschluss über die Selbsteinschätzung der Stakeholder. Anzumerken ist hierzu, dass die Bewertungen lediglich von zwei Institutionen durchgeführt wurden. Daher ist bei den ersten vier Wassernutzungen jeweils die gleiche Selbsteinschätzung angegeben. Der Mittelwert der Selbsteinschätzungen liegt bei 2,1 und 1,7. Nur wenige Fragen wurden mit „unsicher“ bewertet.

Tabelle 4.11: Selbsteinschätzung der Stakeholder im Einzugsgebiet der Salza / Weida (unsicher (1), ziemlich sicher (2) und sicher (3)).

Frage (Kurzform)	Trinkwasser aus Grundwasser	Brauchwasser aus Grundwasser	Brauchwasser aus Oberflächenwasser	Abwassereinleitung aus Kläranlagen	Abwassereinleitung aus Trennsystemen	Gewässerzustand allgemein
	[1-3]	[1-3]	[1-3]	[1-3]	[1-3]	[1-3]
1. Wassernutzungen im EZG	2	2	2	2	2	-
2. Wasserdargebot Kenngrößen	2	2	2	2	2	-
3. Wasserdargebot Bewertung	2	2	2	2	-	-
4. Wasserdargebot Gewichtung	2	2	2	2	2	-
5. Wasserbedarf Kenngrößen	1	1	1	1	2	-
6. Wasserbedarf Bewertung	2	2	2	2	2	-
7. Wasserbedarf Gewichtung	2	2	2	2	2	-
8. Maßnahmen Benennung	3	3	3	3	1	-
9. Maßnahmen Bewertung	3	3	3	3	2	-
10. Maßnahmen Gewichtung	1	1	1	1	1	-
11. Maßnahmen verbale Bewertung	3	3	3	3	1	-
Mittelwert	2,1	2,1	2,1	2,1	1,7	-

4.6 Testregion Obere Iller

4.6.1. Beschreibung des Einzugsgebietes

Die Iller entsteht bei Oberstdorf im Allgäu durch den Zusammenfluss von Breitach, Trettach und Stillach. Mit einer Lauflänge von rund 147 km entwässert sie eine Fläche von ca. 2.150 km² bevor sie südwestlich von Ulm in die Donau mündet. Dabei durchfließt sie das Allgäu und Oberschwaben. Die Obere Iller bis zum Pegel Kempten besitzt eine Einzugsgebietsfläche von rund 955 km² (HND 2009). Es erstreckt sich von 656 müNN bis auf über 2.600 müNN in den Allgäuer Alpen. Ca. 110 km² der Einzugsgebietsfläche befinden sich im Kleinwalsertal, auf österreichischem Staatsgebiet. Im Einzugsgebiet liegen die Städte Kempten, Immenstadt und Sonthofen sowie Oberstdorf, die südlichste Gemeinde Deutschlands. Die Gesamteinwohnerzahl beträgt ca. 150.000 Menschen (Abbildung 4.19).

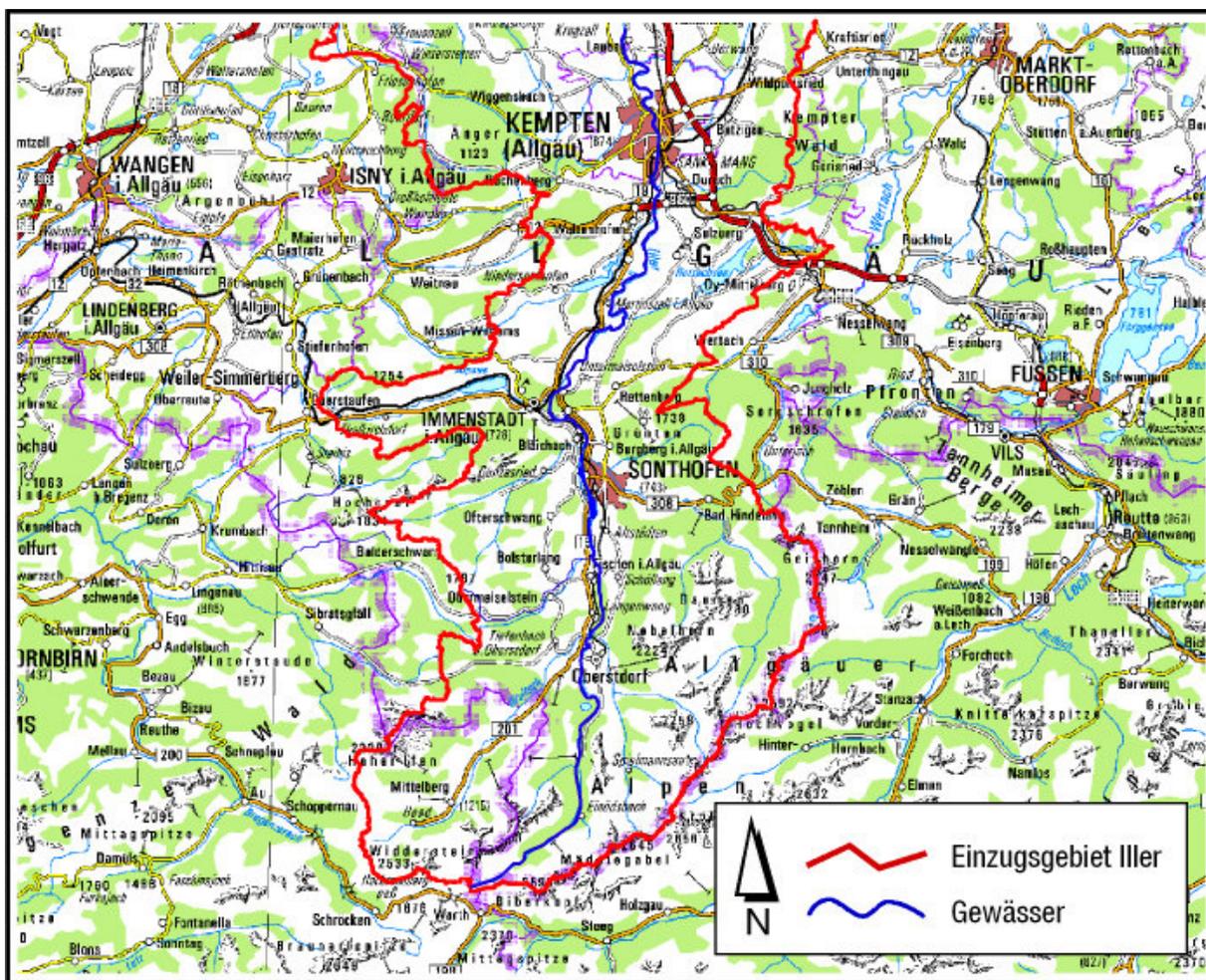


Abbildung 4.19: Einzugsgebiet der Oberen Iller bis Kempten

Die Iller oberhalb des Pegels Kempten ist ein relativ gering anthropogen beeinflusstes Gewässer. Im Einzugsgebiet befinden sich keine Stauhaltungen und größere Brauchwassernutzer. Sämtliche Städte gewinnen ihr Trinkwasser nicht aus den Oberflächengewässern sondern über Tiefbrunnen. Beispielsweise bezieht die Stadt Kempten ca. 80 % ihres Trinkwasserbedarfs vom Zweckverband Fernwasserversorgung Oberes Allgäu, welcher in Altstädten (liegt im

EZG Obere Iller) Tiefbrunnen betreibt. Nördlich von Immenstadt befindet sich seit dem Jahr 2007 der Polder Weidachwiesen im Seifener Becken. Im Hochwasserfall können mit Hilfe dieses Polders bis zu ca. 6 Mio. m³ Wasser einer Hochwasserwelle gekappt und zwischengespeichert werden. In Bezug auf die Vulnerabilität der Wasserwirtschaft ist das Einzugsgebiet der Iller nach ZEBISCH et al. (2005) als „hoch“ einzustufen.

4.6.2. Hydrologische Belastung

Im EZG der Oberen Iller herrscht ein humides Klima (Abbildung 4.20). An der Klimastation Kempton (WEWA) (Gebietsauslass) beträgt der jährliche Niederschlag 1.273 mm bei einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 6,9 °C und 1.755 Stunden Sonnenscheindauer im Jahr. In der Zeitreihe 1971-2000 betragen die hydrologischen Hauptwerte der Oberen Iller 256 m³/s für MHQ, 49 m³/s für MQ und 11,4 m³/s für MNQ. Die GWN betrug 647 mm.

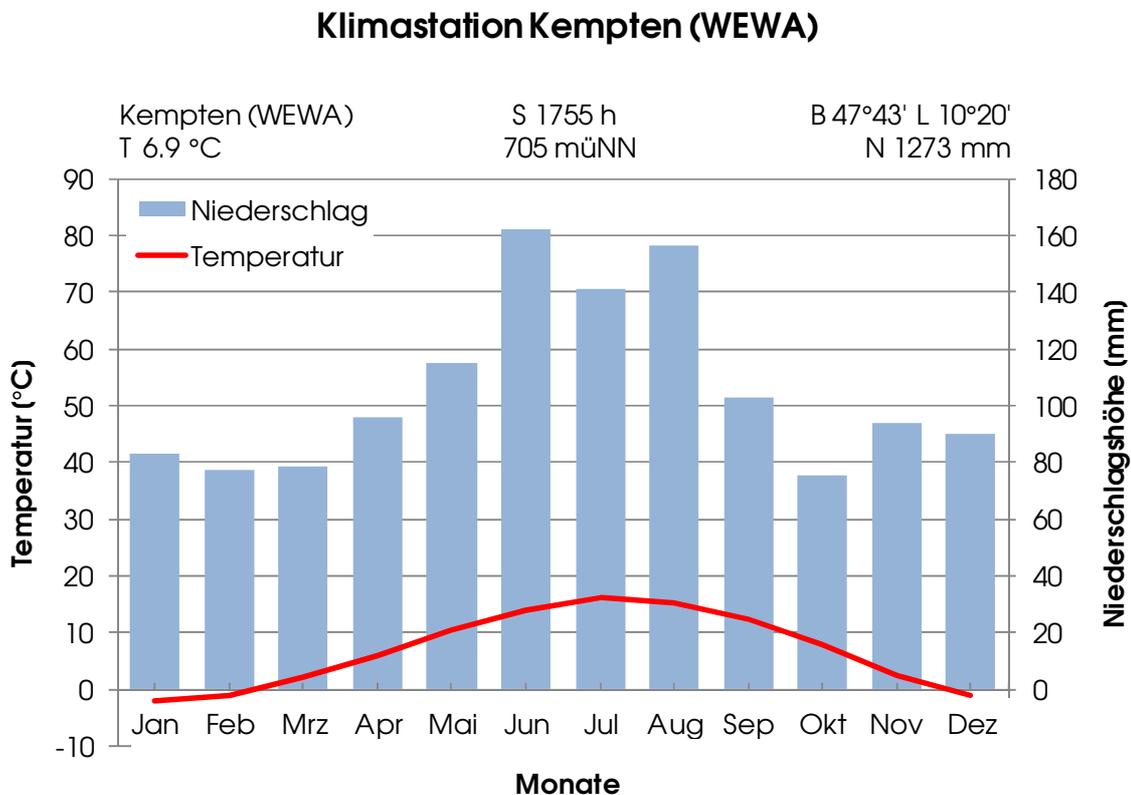


Abbildung 4.20: Walter-Lieth-Klimadiagramm¹² der Klimastation Kempton (WEWA) der Zeitreihe 1961-1990, Datenquelle DWD (2010)

¹² Erläuterungen zum Walter-Lieth-Klimadiagramm, siehe Kapitel 4.4.2

Für dieses Testgebiet ergaben sich aus den Klimaberechnungen folgende hydrologische Auswirkungen¹³:

MHQ:

Die meisten WETTREG Simulationen zeigen sowohl für den Jahresgang als auch für das Sommerhalbjahr einen leichten Rückgang der MHQ-Werte auf. Dieser Rückgang verstärkt sich zunehmend in der fernen Zukunft. Im Winterhalbjahr weisen die WETTREG Realisationen eine leichte Erhöhung auf, die sich auch hier gegen Ende des Jahrhunderts noch verstärkt. Die REMO Rechenläufe zeigen im Jahresgang überwiegend eine Erhöhung von MHQ, die sich in der nahen Zukunft auf das Sommerhalbjahr durchprägt, gefolgt von einem deutlichen Rückgang. Im Winterhalbjahr weist REMO überwiegend eine Erhöhung von MHQ die sich in der fernen Zukunft noch deutlicher zeigt (Abbildung 4.21).

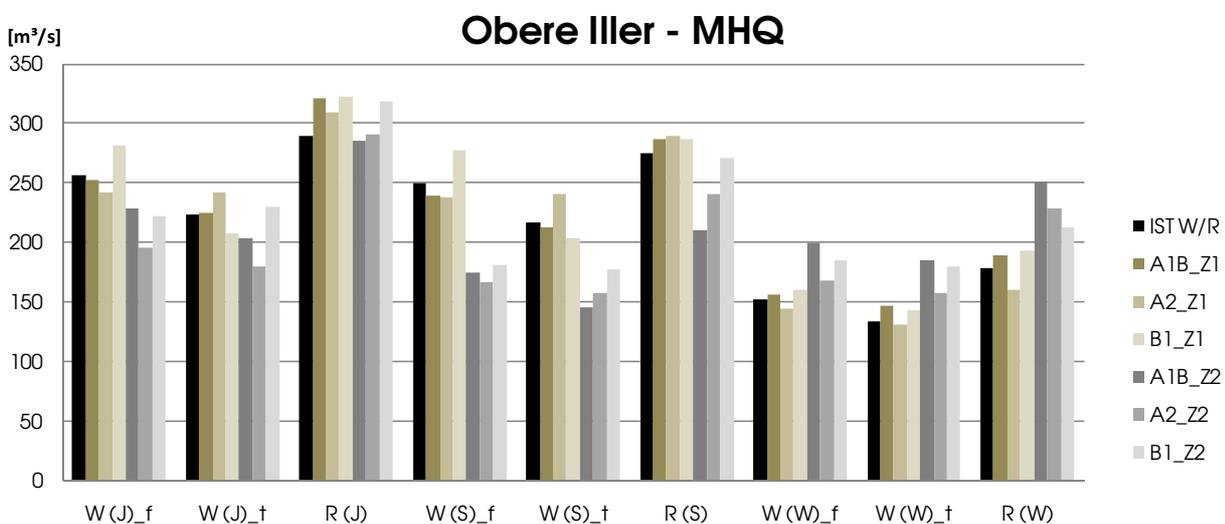


Abbildung 4.21: Hydrologische Belastung MHQ für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempton)

MQ

Sowohl in den trockenen als auch in den feuchten Realisationen zeigt WETTREG einen deutlichen Rückgang von MQ in den Sommermonaten. Dieser Trend verstärkt sich in der fernen Zukunft. Im Winterhalbjahr wird hingegen eine teilweise signifikante Zunahme gesehen. Auch hier verstärkt sich der Trend zum Ende des Jahrhunderts. Im Jahresdurchschnitt zeigt sich überwiegend ein anfangs leichter Rückgang der MQ-Werte, gefolgt von einem größeren Rückgang bis zum Jahr 2100. Bei den REMO Rechenläufen ist in der nahen Zukunft noch mit einer leichten Erhöhung von MQ im Jahresgang zu rechnen. Allerdings sinkt dieser zum Ende des Jahrhunderts unter das Kontrollniveau. In der fernen Zukunft ist bei REMO im Sommerhalbjahr mit einem starken Rückgang der MQ-Werte zu rechnen. Im Winterhalbjahr weist REMO eine Zunahme von MQ aus (Abbildung 4.22).

¹³ Erläuterungen zu den Graphiken, siehe Kapitel 4.4.2.

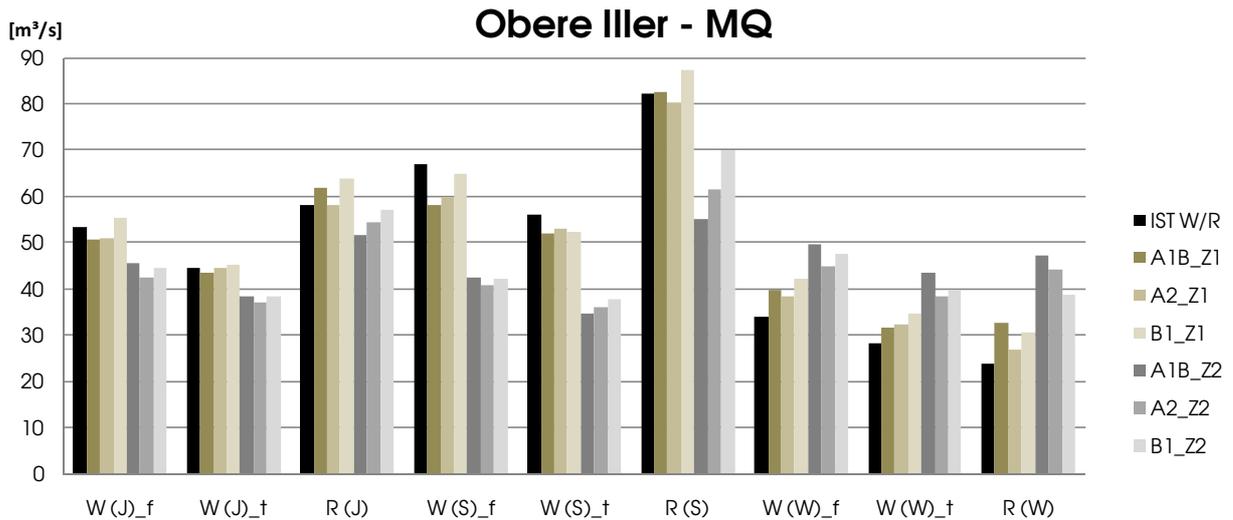


Abbildung 4.22: Hydrologische Belastung MQ für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)

MNQ

Für die MNQ-Werte im Sommerhalbjahr zeigen sowohl die WETTREG als auch die REMO Rechenläufe einen teilweise deutlichen Rückgang gegenüber dem Kontrolllauf auf. Dieser Trend verstärkt sich in der fernen Zukunft. Ebenso zeigen WETTREG und REMO für die Winterhalbjahre eine teilweise deutliche Erhöhung von MNQ. Auch hier verstärkt sich der Trend zum Ende des Jahrhunderts. Im Jahresgang sind die WETTREG Werte relativ ausgeglichen mit einer kleinen Tendenz zur Erhöhung. Bei REMO zeigt sich im Jahresgang durchwegs eine Erhöhung von MNQ (Abbildung 4.23).

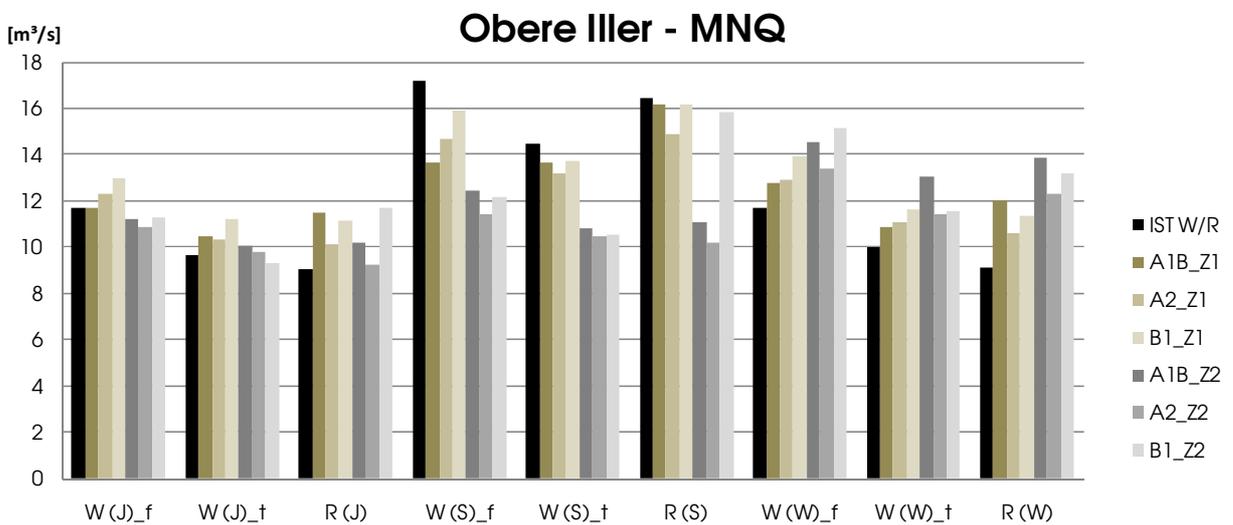


Abbildung 4.23: Hydrologische Belastung MNQ für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)

GWN

Die GWN zeigt bei allen Szenarien ein relativ einheitliches Bild. Sie geht im Sommerhalbjahr erst leicht und in der fernen Zukunft dann deutlicher zurück. Im Winterhalbjahr erhöht sich diese gegenüber dem Kontrolllauf. Im Jahresgang unterscheiden sich WETTREG von REMO wieder etwas mehr. So wird bei WETTREG erst eine leichte Erhöhung der GWN gesehen, gefolgt von einer Reduzierung unter den Wert des Kontrolllaufs. Bei REMO zeigt sich fast durchwegs eine leichte Erhöhung der GWN (Abbildung 4.24).

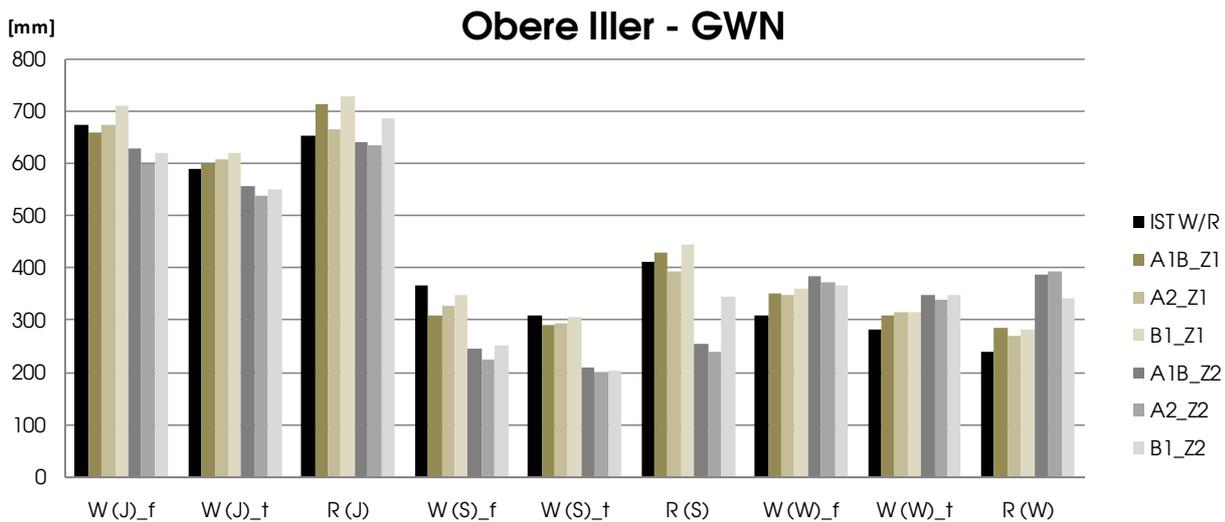


Abbildung 4.24: Hydrologische Belastung GWN für das EZG der Oberen Iller (Pegel Kempten)

Im Vergleich von gemessenen zu berechneten Werten des Kontrolllaufs ergibt sich, dass die feuchte WETTREG Realisation den Mess-Zustand am besten abbildet. Die Abweichungen von WETTREG trocken und REMO befinden sich beide auf einem ähnlichen Niveau (Tabelle 4.12).

Tabelle 4.12: Vergleich der gemessenen hydrologischen Hauptwerte mit den berechneten Werten aus den Kontrollläufen der Regionalisierungsmodelle für das EZG der Oberen Iller

	MHQ [m ³ /s]	MQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	GWN [mm]
Gemessen (Mess)	256	49,1	11,4	647
WETTREG (feucht)	256	53,4	11,7	674
WETTREG (trocken)	223	44,6	9,7	589
REMO	289	58,0	9,1	651

Fazit:

Insgesamt betrachtet zeigen sowohl die WETTREG als auch die REMO Rechenläufe ein homogenes Gesamtbild. Der „Ausreißer“ REMO A2 ist im EZG der Oberen Iller nicht so deutlich ausgeprägt wie in den beiden anderen Testgebieten. Tendenziell ist im EZG mit trockenen Sommern und feuchteren Wintern zu rechnen.

4.6.3. Vorhandene Wassernutzungen

An der am 22.06.2009 stattgefundenen eintägigen Nutzerkonferenz in Kempten (WWA Kempten) erschienen 45 Vertreter der jeweiligen im Einzugsgebiet vorkommenden Wassernutzungen. Der Prototyp des Entscheidungsunterstützungssystems „WASKlim-EUS“ wurde ebenfalls vorgestellt und eine mögliche Anwendung im Einzugsgebiet der Oberen Iller diskutiert. Für folgende Wassernutzungen konnten Daten erhoben werden:

Energieerzeugung:

- Wasserkraftanlagen

Wasserversorgung

- Trinkwasserversorgung aus Grundwasser
- Brauchwasserversorgung aus Grundwasser

Gewässerzustand (wird als Wassernutzung interpretiert)

- Gewässerzustand aus biologischer Sicht
- Abwassereinleitungen aus Kläranlagen
- Fischerei

Hochwasserschutz

- Hochwasserschutzanlagen

4.6.4. Ergebnisse des WASKlim-EUS

Zustandsbewertung

Insgesamt konnten durch die Befragung und durch eigene Ermittlungen Daten für sieben verschiedene Wassernutzungen erhoben werden (Tabelle 4.13). Für die Bewertung der Wassernutzung „Abwassereinleitung aus Kläranlagen“ wurden Indikatoren aus Erfahrungen von den Einzugsgebieten der Wupper und Salza übertragen. Details zu der Bewertung sind im Anhang A.4.4. enthalten.

Tabelle 4.13: Verwendete hydrologische Kenngrößen und Entwicklungskenngrößen der Wassernutzer im EZG der Oberen Iller

Obere Iller	Hydrologische Kenngrößen	Entwicklungs-Kenngrößen
Wasserkraftanlagen	• MQ (J, S, W)	
Brauchwasser aus Grundwasser	• GWN (J)	
Trinkwasser aus Grundwasser	• HHQ (J) • NNQ (J) • GWN (J)	• Bev.Entw.
Hochwasserschutz	• MHQ (J) • Niederschlag (W)	
Gewässerzustand allgemein	• MNQ (J) • UZ<MNQ (J) • W-Temp (S)	• L-Temp. (S)
Naturschutz / Fischerei	• W-Temp (S, W)	• Ökon.Sw.
Abwassereinleitung aus Kläranlagen	• MNQ (S) • UZ<MNQ (S) • GWN (S)	

Nach der Eingabe der Daten in das WASKlim-EUS und der Berechnung der Ergebnisse unter Berücksichtigung von insgesamt neun Klimaszenarien ergab sich folgendes Bild für die Zustandsbewertung der Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 gegenüber 1971-2000 (Abbildung 4.25 und Abbildung 4.26). Erläuterung zur Graphik siehe Kapitel 4.4.4.

Zustandsbewertung 2021-2050 (ohne Maßnahmen)

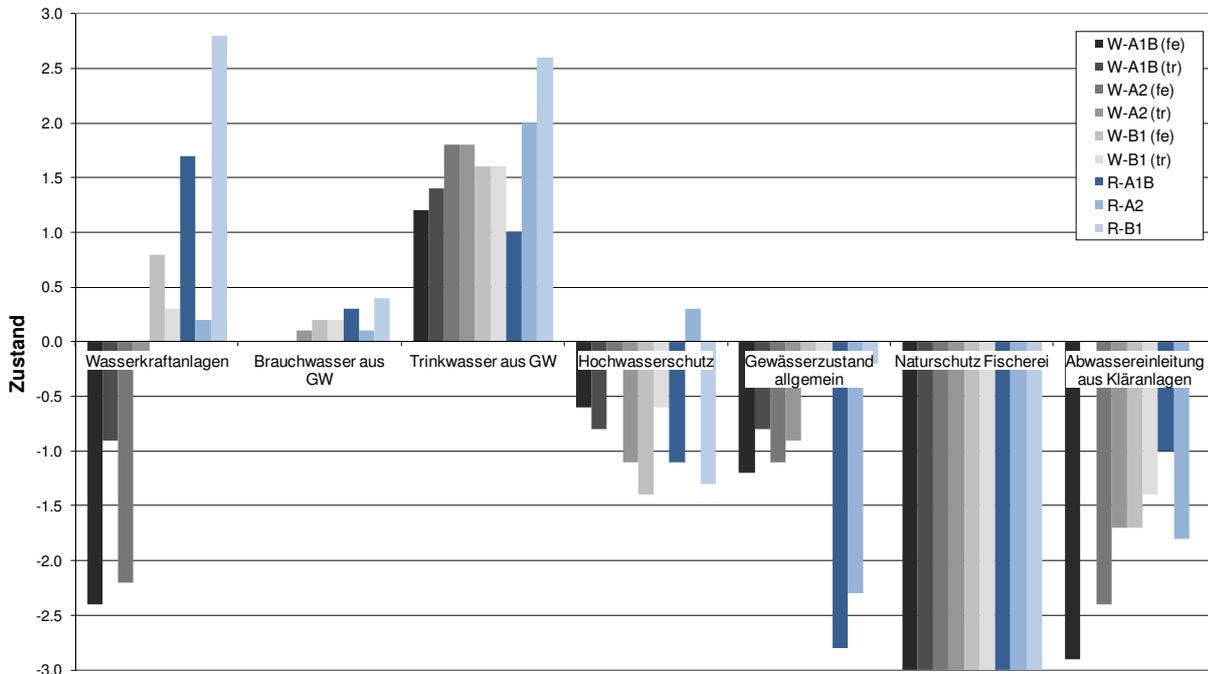


Abbildung 4.25: Zustandsbewertung Obere Iller 2021-2050 gegenüber 1971-2000

Zustandsbewertung 2071-2100 (ohne Maßnahmen)

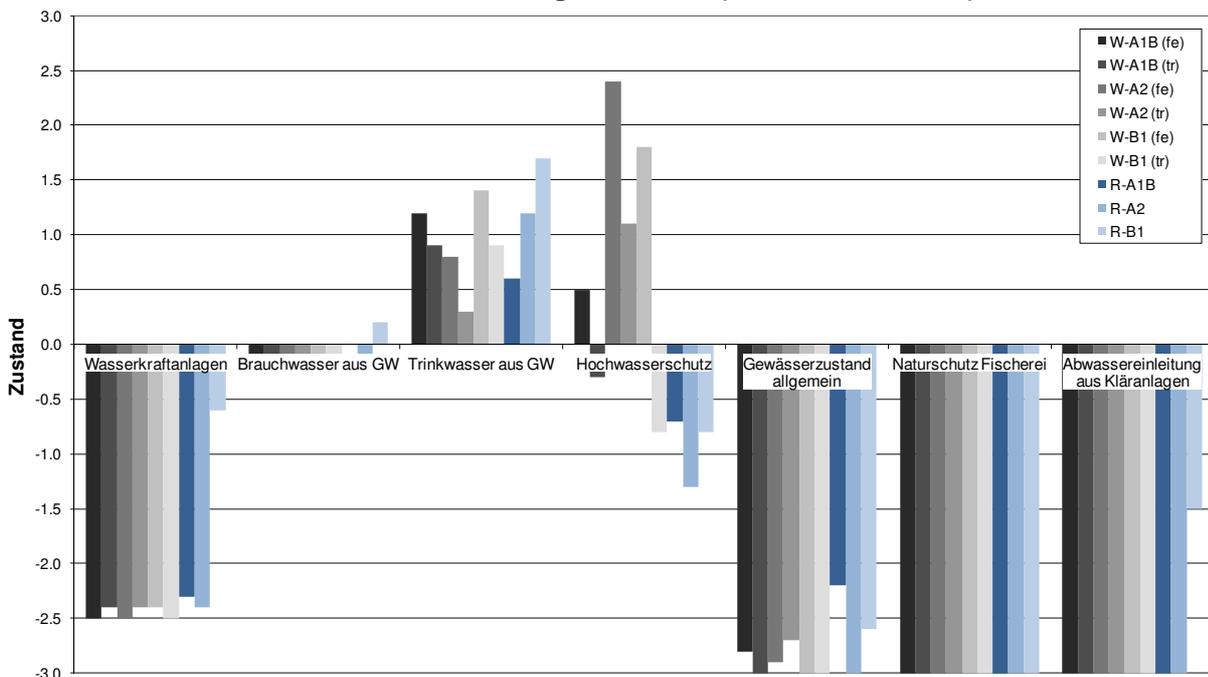


Abbildung 4.26: Zustandsbewertung Obere Iller 2071-2100 gegenüber 1971-2000

Die Ergebnisse der Wassernutzung Wasserkraftanlagen zeigen in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts noch ein kontroverses Bild. Gegen Ende des Jahrhunderts ist die Richtung jedoch eindeutiger (sehr schlecht). Für die restlichen Wassernutzungen ist der Trend schon in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts klarer.

Tabelle 4.14: Zusammenfassung Zustandsbewertung Obere Iller - Mittelwerte (roter Pfeil = negative Zustandsentwicklung, grüner Pfeil = positive Zustandsentwicklung, horizontal = unklare Zustandsentwicklung)

Wassernutzung	2021-2050	2071-2100
Wasserkraftanlagen	↔	↓
Brauchwasser aus Grundwasser	↔	↔
Trinkwasser aus Grundwasser	↗	↗
Hochwasserschutz	↘	↔
Gewässerzustand allgemein	↘	↓
Naturschutz / Fischerei	↓	↓
Abwassereinleitung aus Kläranlagen	↘	↓

Vulnerable Wassernutzungen sind demnach der Hochwasserschutz (schlecht), der Gewässerzustand allgemein (schlecht), der Naturschutz/Fischerei (äußerst schlecht) und die Abwassereinleitungen aus Kläranlagen (schlecht). Zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 4.26) zeigt sich für den Hochwasserschutz ebenfalls ein kontroverses Bild. Hingegen ist der Trend für die Wassernutzungen Gewässerzustand allgemein (äußerst schlecht), der Naturschutz/Fischerei (äußerst schlecht) und die Abwassereinleitungen aus Kläranlagen (äußerst schlecht) in der zweiten Jahrhunderthälfte noch ausgeprägter (Tabelle 4.14).

Da das EZG der Oberen Iller reiche Grundwasservorkommen aufweist, die momentan lediglich ansatzweise genutzt werden, wird sich hier auch in Zukunft keine drastische Verschlechterung einstellen. Je nach Klimaszenario werden Änderungen der GWN (J) von $\pm 10\%$ gesehen. Dadurch werden die Zustände dieser Wassernutzungen (Brauch- und Trinkwasserversorgung) nicht negativ beeinträchtigt. Jedoch musste man beispielsweise während der heißen Sommermonate im Jahr 2003 Wasser aus dem Rottachspeicher in die Obere Iller einleiten (BFG 2006). Nur dadurch konnte der geforderte Mindestwasserabfluss sichergestellt werden. Zukünftig werden sich solche Situationen häufen, was sich für die Nutzungen Wasserkraftanlagen, Fischerei (Naturschutz), Abwassereinleitungen aus Kläranlagen und den Gewässerzustand allgemein nachteilig auswirken wird.

Maßnahmenbewertung

Tabelle 4.15 zeigt die verschiedenen Maßnahmen, die durch die Expertenbefragung vorgeschlagen wurden. Die Gewichtung der einzelnen Wassernutzungen wurde vom Verfasser durchgeführt und ist rein hypothetisch. Die Spalte „Bewertung“ gibt an, welche Maßnahme die beste Bewertung unter Berücksichtigung der Gewichtung aufzeigt. Die Bewertungsskala reicht von äußerst ungeeignet (-3) bis äußerst geeignet (+3). Die Maßnahme

„Düngemanagement anpassen“ wurde unter den vulnerablen Wassernutzungen (fett markiert) am höchsten mit 0,22 Punkten bewertet und sollte daher priorisiert werden. Allerdings ist diese Maßnahmenliste nur ein Auszug aus den möglichen Anpassungsmaßnahmen und kann daher lediglich beispielhaft betrachtet werden. Ebenso konnten Synergieeffekte nicht berücksichtigt werden, da hierzu die entsprechenden Bewertungen nicht erhoben werden konnten.

Tabelle 4.15: Maßnahmenbewertung im EZG der Oberen Iller (fett = vulnerabel)

	Bewertung	Wasserkraftanlagen	Brauchwasser aus Grundwasser	Trinkwasser aus Grundwasser	Hochwasserschutz	Gewässerzustand allgemein	Naturschutz / Fischerei	Abwasserreinigung aus Kläranlagen
Anpassungsmaßnahmen	[-3;+3]	3%	3%	29%	14%	30%	15%	6%
Öffentlichkeitsarbeit im Umgang mit Trinkwasser	0,29			1,0				
Regenwassernutzung	0,43			1,5				
2-ten Polder errichten	-0,19				-1,4			
Speicher für NW-Aufhöhung errichten	-0,42					-1,4		
Einleitungsgrenzwerte an Wassertemperatur anpassen	0,11						0,7	
Düngemanagement anpassen	0,22							1,4

Die Maßnahmen „2-ten Polder errichten“ und „Speicher für NW-Aufhöhung“ erhielten insgesamt eine negative Bewertung von -1,4 da die Maßnahmen folgendermaßen bewertet wurden (Tabelle 4.16):

Tabelle 4.16: Bewertung der Maßnahmen „2-ten Polder bauen“ und „Speicher für NW-Aufhöhung bauen“

Bewertungskriterien	Bewertung	Gewichtung
Nutzen kurz/mittelfristig	0,0	0,0
Nutzen langfristig	3,0	0,2
Beitrag zum Klimaschutz	0,0	0,0
Resilienz (langfristig anpassbar)	1,0	0,1
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)	-3,0	0,7
Gesamtbewertung	-1,4	

4.6.5. Unsicherheiten

Tabelle 4.17 gibt Aufschluss über die Selbsteinschätzung der Stakeholder. Welche ausführlichen Fragen tatsächlich hinter den Kurzbezeichnungen stehen, ist dem Anhang A.3. zu entnehmen. Betrachtet man den jeweiligen Mittelwert, so liegen alle Selbsteinschätzungen zwischen „ziemlich sicher“ und „sicher“. Nur wenige Fragen wurden mit „unsicher“ bewertet. Daraus kann man schließen, dass die Unsicherheiten bei der Beantwortung relativ gering sind.

Tabelle 4.17: Selbsteinschätzung der Stakeholder im Einzugsgebiet der Oberen Iller (unsicher (1), ziemlich sicher (2) und sicher (3))

Frage (Kurzform)	Wasserkraftanlagen [1-3]	Brauchwasser aus Grundwasser [1-3]	Trinkwasser aus Grundwasser [1-3]	Hochwasserschutz [1-3]	Gewässerzustand allgemein [1-3]	Naturschutz / Fischerei [1-3]	Abwasserinleitung aus Kläranlagen [1-3]
1. Wassernutzungen im EZG	3	3	3	2	2	1	-
2. Wasserdargebot Kenngrößen	3	3	2	2	2	1	-
3. Wasserdargebot Bewertung	3	3	2	2	2	1	-
4. Wasserdargebot Gewichtung	3	3	2	2	2	2	-
5. Wasserbedarf Kenngrößen	3	3	2	2	2	1	-
6. Wasserbedarf Bewertung	3	3	2	1	1	1	-
7. Wasserbedarf Gewichtung	3	3	1	1	1	1	-
8. Maßnahmen Benennung	3	3	3	3	3	3	-
9. Maßnahmen Bewertung	3	3	3	2	2	3	-
10. Maßnahmen Gewichtung	3	3	2	2	2	3	-
11. Maßnahmen verbale Bewertung	3	3	2	2	2	3	-
Mittelwert	3,0	3,0	2,2	1,9	1,9	1,8	-

4.7 Qualität und Sensitivität der Ergebnisse

Die Ergebnisse der drei untersuchten Testgebiete zeigen, dass das neu entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem WASKlim-EUS für die genannte Aufgabenstellung anwendbar ist. In allen drei Gebieten konnten Experteneinschätzungen erhoben, das WASKlim-EUS aufgestellt und vulnerable Wassernutzungen identifiziert werden. Dabei zeigten die Ergebnisse ein recht deutliches Bild des zukünftigen Zustands der betrachteten Wassernutzung. Auch werden die Unterschiede bzw. die Unsicherheiten der Klimaszenarien (A1B, A2, B1) und dadurch die Sensitivität der Ergebnisse deutlich hervorgehoben.

Aus den Resultaten im Einzugsgebiet der Salza wird klar, dass die Ergebnisse der downscaling Verfahren recht unterschiedlich sein können. So sagen beispielsweise die WETTREG Projektionen für nahezu alle Wassernutzungen eine negative Entwicklung voraus,

wo hingegen die REMO Rechenläufe teilweise positive Ergebnisse liefern. Welche Downscalingmethode zutreffender sein könnte, ist jedoch meist nur schwer bis gar nicht feststellbar. In einem solchen Fall sind sogenannte no-regret Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren. Das heißt Maßnahmen, die unabhängig vom Klimawandel positive Effekte auf andere Nutzungen oder die Umwelt haben.

In allen drei Testgebieten zeigten überwiegend die WETTREG Berechnungen ein einheitliches Bild. Die REMO Rechenläufe sagen gegenüber den WETTREG Projektionen teilweise kontroverse Entwicklungen voraus. Daher sind die jeweiligen Regionalisierungsverfahren die sensitivsten Eingangsparameter. Anzumerken ist hierzu, dass bei jeder zukünftigen WASKlim-EUS Anwendung möglichst viele Klimaszenarien und unterschiedliche Downscalingmethoden in das System eingebunden werden sollten. Dadurch erhält man eine Vorstellung über die Sensitivität und eine größere Bandbreite der Ergebnisse. Von Vorteil erweist sich hier die Möglichkeit der Eingabe von synthetischen Klimaszenarien, welche auch manuell erzeugt werden können.

Wichtig für die Plausibilität der Ergebnisse ist die Trendeinschätzung der Stakeholder, ab wann ein Indikator als positiv oder als negativ zu bewerten ist. Das heißt, ob eine mögliche Erhöhung von beispielsweise dem Mittelwasserabfluss eine Verbesserung oder eine Verschlechterung des Zustandes der zu bewertenden Wassernutzung zur Folge hat. Die detaillierte Einschätzung der prozentualen Änderungen der jeweiligen Bewertungsstufen spielt dabei eine untergeordnete Rolle und ist lediglich ein Maß für die Stärke der Ausprägung des zukünftigen Zustandes. Will man dennoch die Sensitivität der Stakeholdereinschätzungen ermitteln, ist die Variation sehr groß, da prinzipiell an jedem Eingabewert (z.B. prozentuale Änderung oder Gewichtungen) die Sensitivität geprüft werden kann. Einschränken kann man diese, indem man entsprechend der Selbsteinschätzung der Stakeholder zuerst die Eingangsdaten variiert, die bei der Bewertung mit „unsicher“ eingestuft wurden.

4.8 Optimierungsmöglichkeiten und kritische Betrachtung des WASKlim-EUS

Die Ergebnisse zeigen, dass eine detaillierte Bewertung der prozentualen Änderungen der jeweiligen Bewertungsstufe nicht so bedeutsam ist, wie die eigentliche Festlegung der Kenngrößen (bspw. MQ oder MNQ) und derer Übergangsbereiche von einem positiven in einen negativen Zustand. Diese Übergangsbereiche stellen somit Schwellenwerte dar, ab wann Handlungsbedarf konstatiert wird. Daher ist es auch denkbar, dass zukünftig anhand von Erfahrungswerten die Festlegung und Bewertung der Kenngrößen erfolgen kann. Somit wären bereits erste Ergebnisse erzielbar, ohne dass umfangreiche Stakeholderbefragungen durchgeführt werden müssten. Stellt sich nun Handlungsbedarf ein, können die betroffenen Stakeholder eingebunden und das Entscheidungsunterstützungssystem mit ihrer Hilfe verfeinert und optimiert werden.

Problematisch bei der Anwendung des WASKlim-EUS erwiesen sich im Wesentlichen folgende Punkte:

- 1) Viele Einzugsgebiete in Deutschland sind bereits stark anthropogen verändert. Deutlich zeigt sich dies im Einzugsgebiet der Wupper. Hier wird das natürliche Abflussregime durch ein umfangreiches Talsperrensystem so beeinflusst, dass Aussagen beispielsweise über Niedrigwassersituationen lediglich fiktiv betrachtet werden können, da die Nachbildung der Talsperrensteuerung für die Kalibrierung eines Wasserhaushaltsmodells nur mit sehr großem Aufwand möglich ist, sofern überhaupt die benötigten Unterlagen vorliegen.

- 2) Prinzipiell ist das Entscheidungsunterstützungssystem WASKlim-EUS für die Anwendung in Behörden gedacht, welche eine umfassende Bewertung potenzieller Anpassungsmaßnahmen durchzuführen haben. Da jedoch die maßgeblichen Eingaben, beispielsweise die Bewertungen der hydrologischen Kenngrößen und der Entwicklungskenngrößen, von den Vertretern der Wassernutzungen anzugeben sind, ist hier die Mitarbeit von meist privaten Einrichtungen erforderlich. Die Motivation für die Mitwirkung variiert jedoch sehr, da der persönliche Nutzen meist nicht direkt erkennbar ist. Je mehr Vertreter von Wassernutzungen sich an dem Prozess beteiligen, desto besser ist auch das zu erwartende Ergebnis des WASKlim-EUS. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte wenigstens eine Person je vorhandene Wassernutzung motiviert werden, sich einzubringen. Zukünftig sollten dies jedoch mehr sein, so dass das erzielte Ergebnis die Meinung einer breiteren Masse umfasst. Ebenso könnten dann auch die Synergieeffekte besser erhoben und im System berücksichtigt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel stellen ein aktuelles und in den Medien sehr präsenten Themenfeld dar. In der vorliegenden Arbeit hat sich der Verfasser im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, betreut durch das Umweltbundesamt, dieser Thematik angenommen und ein neues Entscheidungsunterstützungssystem, das den Namen „WASKlim-EUS“ erhielt, entwickelt. Mit Hilfe des neuen Systems können für ein bestimmtes Flusseinzugsgebiet mögliche zukünftige Zustände ausgewählter Wassernutzungen unter Berücksichtigung des Klimawandels aufgezeigt werden. Anhand verschiedener Anpassungsmaßnahmen und deren Bewertung durch Stakeholder kann zudem eine festgelegte Anpassungsstrategie umgesetzt werden. Das System beruht u.a. auf den Methoden der Fuzzy-Logik, des Analytischen-Hierarchie-Prozesses (AHP) und der Nutzwertanalyse (NWA).

Hierzu wurden die Grundlagen der Thematik Klimawandel erläutert und verschiedene Global- wie auch Regionalmodelle, die zur Simulation des zukünftigen Klimas dienen, beschrieben. Ebenso wurden die dazu benötigten Klimaszenarien, die vom IPCC veröffentlicht wurden, charakterisiert. Derzeit werden in Deutschland überwiegend das Globalmodell ECHAM 5 und die Regionalmodelle REMO, CLM, WETTREG und STAR verwendet. In einer Studie wurde für ganz Deutschland das zukünftige Klima auf oben genannter Basis berechnet. Dabei zeigte sich, dass bis zum Ende des Jahrhunderts mit einer Temperaturerhöhung im Sommer von bis zu 5 °C (REMO, CLM) für das Klimaszenario A1B zu rechnen ist. Die stärksten Erwärmungen sind im Südwesten und die mäßigsten Zunahmen im Nordosten von Deutschland zu erwarten. Im Sommer werden die Niederschläge um ca. 15 % bis ca. 25 % gegen Ende des Jahrhunderts abnehmen. Dagegen erhöhen sie sich im Winter um ähnliche 15 % bis 25 %, bei einzelnen Berechnungen sogar um bis zu 70 % (WETTREG). In ähnlicher Weise wurde vom Verfasser die klimatische Wasserbilanz für ganz Deutschland basierend auf dem Regionalmodell WETTREG und für das Klimaszenario A1B berechnet. Hier zeigte sich ein analoges Bild. Die Sommerhalbjahre werden zunehmend trockener und die Winterhalbjahre eher feuchter. Im Jahresmittel gehen die Werte der klimatischen Wasserbilanz leicht zurück. Zudem zeigte sich, dass im Jahresdurchschnitt Ostdeutschland im Vergleich zu Westdeutschland noch trockener wird. Diese Trends konnten bestätigt werden, indem die verschiedenen großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland anhand einer umfassenden Literaturrecherche analysiert wurden. Inwiefern sich die Klimaänderung auf die verschiedenen Wassernutzungen Wasserversorgung, Wasserkraft, Binnenschifffahrt und den ökologischen Gewässerzustand auswirkt, wurde ebenfalls untersucht. Es zeigte sich, dass Deutschland zwar ein wasserreiches Land ist, in dem lediglich rund 19 % aller Wasserressourcen genutzt werden. Die zeitlich und regional unterschiedliche Verteilung kann jedoch bereits heute zu Engpässen in der Wasserversorgung führen (z.B. Kühlwasserbedarf für Wärmekraftanlagen). Die Energieerzeugung aus Wasserkraft wird aufgrund der Niederschlagsverschiebung in die Wintermonate bis zur Mitte des Jahrhunderts wahrscheinlich leicht zunehmen, anschließend jedoch, aufgrund des weiteren Temperaturanstiegs, wieder rückläufig sein. Bayern und Baden-Württemberg sind die Länder mit dem größten Potenzial und können mit moderneren Anlagen oder angepasster bzw. vergrößerter Stauhaltung in den Speicherseen auf den Klimawandel reagieren. Die Binnenschifffahrt ist speziell an der Donau zwischen Straubing und Vilshofen, an der Elbe und an der

Oder gefährdet, da der Mindestwasserstand für die Schifffahrt zukünftig öfters unterschritten werden könnte. Auch am Rhein, unterhalb von Karlsruhe, traten im Trockensommer 2003 Transportbeeinträchtigungen aufgrund geringer Wasserstände auf. Maßnahmen werden hier u.a. in einer optimierten Lagerhaltung (Logistik) und in moderneren Schiffstypen (Gewichtseinsparung) gesehen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den ökologischen Gewässerzustand sind komplex und noch nicht weit genug erforscht, um belastbare Aussagen treffen zu können. Jedoch wird die Erhöhung der Wasser- und Lufttemperatur als äußerst kritisch betrachtet. Inwiefern sich die Wassereinleitungen von Wärmekraftwerken (zusätzliche Erhöhung der Wassertemperatur) und die erhöhte Schadstoffkonzentration aufgrund geringerer Niedrigwasserführung während der Sommermonate auf die Gewässergüte auswirken wird, ist noch weiter zu untersuchen.

Die daraus entstandene Notwendigkeit, eine Anpassungsstrategie an den Klimawandel zu entwickeln, geht klar hervor. Daher haben sich die Vereinten Nationen entschieden, ein Klimaabkommen zu unterzeichnen, das die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau fordert, auf dem gefährliche anthropogene Störungen des Klimasystems verhindert werden. Die Bundesregierung hat sich zum klimapolitischen Ziel gesetzt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf weniger als 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu erreichen (KOMPASS 2009). Zudem hat die Bundesregierung im Dezember 2008 eine „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ beschlossen (BUNDESREGIERUNG 2008). Ein wesentliches Ziel der DAS ist es, die Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen zu stärken. Die Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen haben bereits eigene Klimaanpassungsstrategien veröffentlicht.

Der eigentliche Kern der Arbeit stellt die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems dar, das den Prozess der Anpassung an die Folgen des Klimawandels erleichtern soll. Der Verfasser zeigt, dass derzeit noch kein ähnliches System existiert, das die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Aufzeigen der Vulnerabilität und der Anpassungskapazität verschiedener Wassernutzungen hinsichtlich des Klimawandels
- Einführung von relevanten Schwellenwerten, mit deren Hilfe die Auswirkungen des Klimawandel beschrieben werden können
- Berücksichtigung von Rahmenbedingungen wie den demographischen Wandel oder die Globalisierung
- Geeigneter Umgang mit Unsicherheiten in den Klimavorberechnungen
- Berücksichtigung von Synergieeffekten
- Übertragbarkeit auf andere Bereiche außerhalb der Wasserwirtschaft

Das neu entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem, das den Namen „WASKlim-EUS“ erhielt, weist folgenden Aufbau auf (Abbildung 5.1):

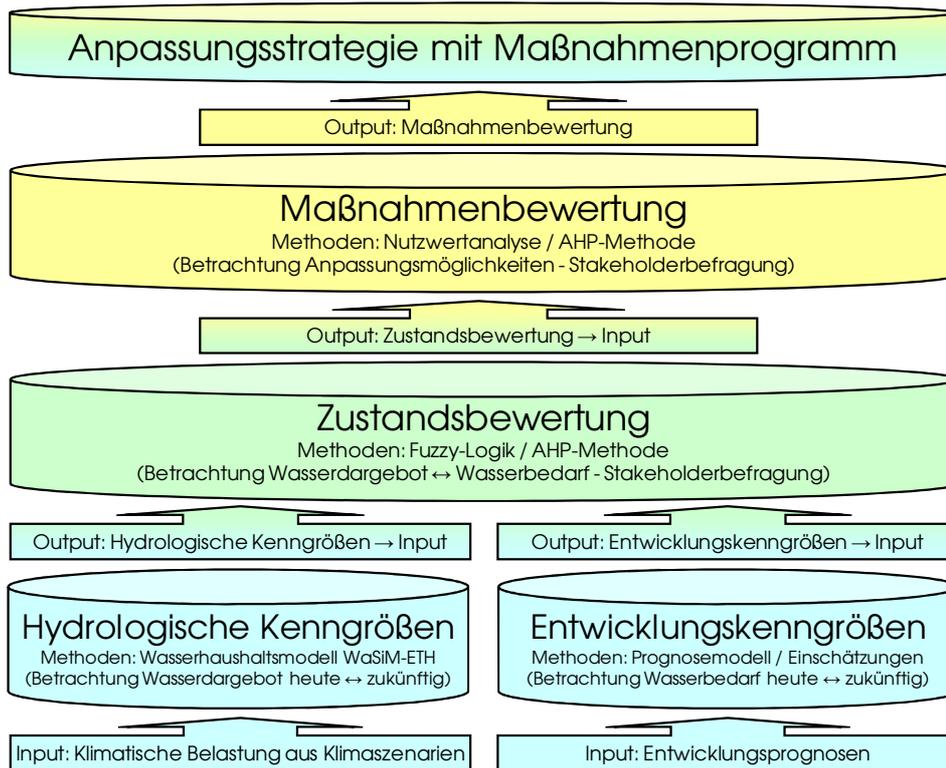


Abbildung 5.1: Aufbauschema des WASKlim-EUS

Wichtige Bestandteile des neuen Systems bilden die unterschiedlichen SRES-Klimaszenarien und die daraus abgeleiteten hydrologischen Kenngrößen für die Ermittlung des zukünftigen Wasserdargebotes. Für die Ermittlung des zukünftigen Wasserbedarfs sind Bevölkerungsvorausberechnungen, meteorologischen Daten sowie Einschätzungen zum ökonomischen Strukturwandel, welche insgesamt als Entwicklungskenngrößen bezeichnet werden, von größerer Bedeutung. Aus einem Vergleich der bewerteten hydrologischen Kenngrößen und den Entwicklungskenngrößen wird die Zustandsbewertung in Abhängigkeit ausgewählter Szenarien und Prognosen für die betrachteten Wassernutzungen berechnet. Für die Berechnung der hydrologischen Kenngrößen wurde das Wasserhaushaltssystem WaSiM-ETH verwendet. Die Bewertung des Zustandes ausgewählter Wassernutzungen erfolgt dabei auf Basis der sogenannten Fuzzy-Logik. Wesentliche Vorteile dieser Methode beruhen auf der Möglichkeit, Stakeholdermeinungen und darin enthaltene Unsicherheiten und Unsicherheiten in den Klima- und Entwicklungsszenarien berücksichtigen zu können. Liegen die Zustandsbewertungen ausgewählter Wassernutzungen vor, werden durch weitere Expertenbefragungen potenzielle Anpassungsmaßnahmen eruiert und bewertet. Die Auswertung der Anpassungsmaßnahmen basiert auf der Nutzwert-Analyse (NWA), die mit Hilfe des Analytischen-Hierarchie-Prozess (AHP) erweitert werden kann. Liegt eine Priorisierung der betrachteten Wassernutzungen vor, welche von übergeordneten Behörden durchgeführt werden kann, fließt in die Gesamtbewertung der Anpassungsmaßnahmen somit auch die gewählte Anpassungsstrategie mit ein. Ergebnisse des neu entwickelten WASKlim-EUS sind zum einen die Ermittlung der zukünftigen Zustände verschiedener Wassernutzungen und den daraus ableitbaren Handlungsbedarf, zum anderen die Eruiierung potenzieller Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung von Synergieeffekten.

Mit Hilfe eines ausführlichen Anwendungsbeispiels wird die Funktionsweise des WASKlim-EUS eingehend erläutert. Ebenso geht der Verfasser auf mögliche Erweiterungen des Entscheidungsunterstützungssystems ein und stellt die Übertragbarkeit des neu entwickelten Systems auf andere Bereiche außerhalb der Wasserwirtschaft dar.

Der Schluss der Arbeit bildet die praktische Anwendung des WASKlim-EUS anhand dreier ausgewählter mesoskaliger Testgebiete. Die Testgebiete wurden dabei so gewählt, dass eine möglichst große Bandbreite an unterschiedlichen Klimaregionen in Deutschland abgedeckt werden konnte. So wurde als Testgebiet die Wupper in Nordrhein-Westfalen als Mittelgebirgsregion, die Salza in Sachsen-Anhalt als Trockenregion und die Obere Iller in Bayern als voralpines Einzugsgebiet ausgewählt. In allen drei Regionen wurden Wasserhaushaltsberechnungen der sogenannten nahen (Zeitraum: 2021-2050) und der fernen (Zeitraum: 2071-2100) Zukunft durchgeführt.

Insgesamt betrachtet zeigte sich an der Wupper, dass die WETTREG Rechenläufe ein homogeneres Gesamtbild des zukünftigen Wasserdargebotes abbilden. Die REMO Rechenläufe weisen dagegen öfters signifikante Abweichungen vom Kontrolllauf auf. Hinzu kommt, dass das REMO A2 Szenario meist den restlichen REMO Berechnungen widerspricht. Tendenziell ist im EZG der Wupper mit etwas trockeneren Sommern und feuchteren Wintern zu rechnen. Jedoch wird sich der MNQ Wert im Sommer eher etwas erhöhen. Auf dieser Basis wurden Stakeholderbefragungen mit Hilfe eines eigens dafür entwickelten Fragebogens durchgeführt und der Zustand und mögliche Anpassungsmaßnahmen für das EZG der Wupper erhoben. Nach Einspeisung der Daten in das neu entwickelte WASKlim-EUS zeigte sich, dass für die Wassernutzungen Wasserkraftanlagen, Kühlwasserentnahmen und –einleitungen, sowie für die Fischerei Handlungsbedarf besteht. Bei der Auswertung der Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung einer ausgewählten Anpassungsstrategie konnte die Maßnahme „Gewässerschutz (oberirdisch)“ als sehr zu empfehlen ermittelt werden.

Im EZG der Salza zeigten ebenfalls die WETTREG Rechenläufe ein homogeneres Gesamtbild als REMO. Auch hier weisen die REMO Rechenläufe öfters signifikante Abweichungen zum Kontrolllauf auf und das REMO A2 Szenario steht meist im Widerspruch zu den restlichen REMO Berechnungen. Tendenziell ist im EZG der Salza nach den WETTREG Simulationen mit trockenen Sommern und trockenen Winter zu rechnen. Die REMO Berechnungen zeigen ein eher kontroverses Bild mit Ausprägungen in beide Richtungen. Auch hier wurden Stakeholderbefragungen durchgeführt. Mit Hilfe des WASKlim-EUS wurde Handlungsbedarf für alle betrachteten Wassernutzungen ermittelt. Als Anpassungsmaßnahme erwies sich die Maßnahme „Fernwassernetz ausbauen“ als die geeignetste.

Für das EZG der Oberen Iller zeigten sowohl die WETTREG als auch die REMO Rechenläufe ein homogenes Gesamtbild. Der „Ausreißer“ REMO A2 ist im EZG der Oberen Iller nicht so deutlich ausgeprägt wie in den beiden anderen Testgebieten. Tendenziell ist im EZG mit trockeneren Sommern und feuchteren Wintern zu rechnen. Als vulnerable Wassernutzungen wurden Wasserkraftanlagen, der Gewässerzustand allgemein, die Fischerei und die Abwassereinleitungen aus Kläranlagen ermittelt. Als geeignete Anpassungsmaßnahme wurde u.a. die Maßnahme „Düngemanagement anpassen“ festgestellt.

Problematisch bei der Anwendung des WASKlim-EUS in den Testregionen erwies sich die Einbindung der Stakeholder für die Bewertung des Wasserdargebotes, des Wasserbedarfs und der Anpassungsmaßnahmen, da die Auswirkungen der Klimaänderung nur schwer erfassbar sind. Zukünftig könnten für eine erste Einschätzung der Klimaänderungsauswirkungen Erfahrungswerte für das WASKlim-EUS verwendet werden, die bei Bedarf entsprechend durch Stakeholderbefragungen ergänzt werden.

Insgesamt betrachtet zeigen die erzielten Ergebnisse plausible Resultate, die im Weiteren beispielsweise hinsichtlich einer monetären Bewertung noch näher zu betrachten sind. Wird das neu entwickelte WASKlim-EUS zukünftig im Auftrag einer Entscheidungsbehörde angewendet, sollte jedoch darauf geachtet werden, dass möglichst viele Stakeholder in die Befragungen mit eingebunden werden. Je mehr Bewertungen zu den vorhandenen Wassernutzungen und potenziellen Anpassungsmaßnahmen vorliegen, desto fundiertere Ergebnisse können mit dem WASKlim-EUS ermittelt werden.

Bei mehreren Konferenzen wurde das WASKlim-EUS vorgestellt und kritisch diskutiert. Es zeigte sich, dass das neue EUS angenommen wird und, nach Meinung der Experten, ein sehr nützliches Instrumentarium für die Wahl einer Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel darstellt. Da es derzeit noch keine vergleichbaren Werkzeuge gibt, bleibt abzuwarten, inwiefern die weitere Entwicklung des neuen Systems forciert wird. Momentan ist bereits angedacht, das System mit Hilfe einer graphischen Oberfläche benutzerfreundlicher zu gestalten und bei Behörden, die strategische Entscheidungen treffen, einzusetzen. Inwiefern dies auch umgesetzt wird, ist jedoch nicht nur eine Entscheidung aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten, sondern auch eine finanzielle. Dass jedoch Entscheidungen zur Anpassung an den Klimawandel getroffen werden müssen, ist unumstritten. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass es hierfür Methoden und Verfahren gibt, die den Prozess unterstützen und dadurch erleichtern. Im WASKlim-EUS können eine Vielzahl von unsicheren Daten auf geeignete Art und Weise aufbereitet, ausgewertet und nachvollziehbar dargestellt werden. Ebenso fließen Expertenmeinungen in die Auswertung mit ein, die für eine erfolgreiche Umsetzung der gewählten Anpassungsmaßnahmen unumgänglich sind. Das System stellt zudem eine Basis dar, mit deren Hilfe deutschlandweit einheitlich Anpassungsmaßnahmen eruiert und priorisiert werden können.

Literaturverzeichnis

- ANDERSON, E. A. (1973): National Weather Service river forecast system - snow accumulation and ablation model. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), Tech. Mem., *NWS-HYDRO-17*, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, MD.
- BAH BERLIN (2009): Büro für angewandte Hydrologie. Hydrologische Grundlagenuntersuchungen im Einzugsgebiet der Salza, http://www.bah-berlin.de/Hydrologische_Grundlagenuntersuchungen__Salza.pdf, Zugriff am 29.06.2009.
- BACHMANN, D.; HUBER, N. P.; KUFELD, M.; SCHÜTTRUMPF H. (2009): Methodik der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung zur Erstellung eines Hochwasserschutzkonzeptes, In: Korrespondenz Wasserwirtschaft, Hennef
- BAMBERG, G. & COENENBERG, A. (2000): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 10. überarbeitete Auflage, München. S. 48.
- BÁRDOSSY, A. (1996): The use of fuzzy rules for the description of elements of the hydrological cycle. - *Ecological Modelling*, H. 85, S. 59–65.
- BARTH, E.; MOLNAR, T.; ØVERLAND, H. (2004): Simulation des Wasserhaushalts für das Obere Maingebiet. In: KLIWA-Heft 4: "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft -Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 3. und 4.5.2004 in Würzburg" ,S.115 - 119.
- BARTUSSECK, S. (2005): Regelbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) zur Bewertung von Maßnahmenplänen gemäß EG-WRRL. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 103-110.
- BBR (1983): Bundesamt Bauwesen und Raumordnung. Investitionsrechnungsverfahren in der Bauplanung, Heft Nr. 089, Koblenz.
- BBR (2009): Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Raumordnungsprognose 2025 /2050, Berichte, Band 29, http://www.bbsr.bund.de/cln_005/nn_22710/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Ablage__Meldungen/Berichte29.html, Zugriff am 06.07.2009.
- BDB (2008): Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt e.V. Das deutsche Wasserstraßennetz, <http://www.binnenschiff.de/>, Zugriff: 18.11.2008
- BDEW (2007): Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Die öffentliche Wasserversorgung in Deutschland, Berlin, S. 4, S. 5.
- BEIERKUHNLEIN, C.; FOKEN, T.; SCHMID, N.; WOLF, B.; GOHLKE, A.; ALT, M.; THOMAS, S.; STAHLMANN, R.; DECH, S.; JENTSCH, A.; KUZYAKOV, Y.; MATZNER, E.; MENZEL, A.; PEIFFER, S.; RÖTZER, T.; STEFFAN-DEWENTER, I.; TENHUNEN, J.; WALTHER, GR.; BURGHARDT, D.; WIESENBERG, G.; GLASER, B.; JACOBET, J.; PRETZSCH, H.; BECK, C.; MELZER, A. (2008): Klimawandel in Bayern, Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten, Bayreuth.
- BELZ, J.U.; ENGEL, H.; KRAHE, P. (2004): Das Niedrigwasser 2003 in Deutschlands Stromgebieten. In: *Hydrologie und Wasserwirtschaft*, 48.Jahrgang, Heft 4.S.162 - 169.
- BERTHOLD, G & HERGESELL, M. (2005): Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen. Klima-

- folgen in der Wasserwirtschaft (Grundwasser), INKLIM 2012, Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen, Projektbaustein II, Klimawandel und Klimafolgen in Hessen, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abschlussbericht. S. 16 - 21.
- BEVEN, K. J. & KIRKBY, M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24 (1). S. 43-69.
- BFG (2002a): Bundesanstalt für Gewässerkunde. Einsatz ökologischer Modellsysteme zur Unterstützung von Entscheidungen bei Eingriffen in Fließgewässern. Reihe: BfG-Veranstaltungen, 4-2002, Koblenz.
- BFG (2002b): Bundesanstalt für Gewässerkunde. Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet. Koblenz. S.3, 33.
- BFG (2003): Bundesanstalt für Gewässerkunde. GLOWA Elbe I, Teilaufgabe 2.3: Ballungsraum Berlin/Untere Havel, Schlussbericht, Koblenz, S 81-86.
- BFG (2006): Bundesanstalt für Gewässerkunde. Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland, Ursachen-Wirkung-Folgen. Mitteilung Nr. 27, Koblenz, S. 162-165, 167-169, 172, 176, 180, 181, 183, 185, 194.
- BFG (2009a): Bundesanstalt für Gewässerkunde. Decision Support System (DSS) am Beispiel der Elbe. <http://elise.bafg.de/?3283>. Zugriff am 23.09.2009
- BFG (2009b): Bundesanstalt für Gewässerkunde. KLIWAS-Projekt 4.01-„Hydrologie und Binnenschifffahrt“, Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt, http://www.bafg.de/nn_163326/M2/DE/05_KLIWAS/kliwas__node.html?__nnn=true, Zugriff am 11.08.2009.
- BHUSHAN, N. & RAI, K. (2004): *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. New York. 172 pp.
- BILLIB, M.; BOOCHS, P.W.; DA SILVA, T.C.; DE SILANS, A.P. (2003): Decision Support System für die Wasserwirtschaftsplanung im semiariden Nordost-Brasilien. In: *KA-Abwasser, Abfall 2003* (50) Nr. 2. Hennef. S. 172-176.
- BINNENSCHIFF (2009): Daten und Fakten. http://www.binnenschiff.de/downloads/daten_und_fakten/Daten_und_Fakten_2008_2009.pdf. Zugriff am 15.12.2009.
- BMU (2003): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Hydrologischer Atlas von Deutschland*, 3. Lieferung 2003, Bonn.
- BMU (2005): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Die Wasserrahmenrichtlinie – Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland*, Berlin, S. 10, 36, 40-42, 49-51.
- BMU (2009a): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Erneuerbare Energien in Zahlen – Internet-Update ausgewählter Daten*, Berlin, S. 6.
- BMU (2009b): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Dem Klimawandel begegnen – Die Deutsche Anpassungsstrategie*. Berlin. S. 59.
- BRAHMER, G.; RICHTER, K.-G., CZESNIAK, R. (2005): Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer). In: INKLIM 2012, Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen, Projektbaustein II, Klimawandel und Klimafolgen in Hessen, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abschlussbericht. S.23 - 28.
- BRAHMER, G. (2006): *Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Hes-*

- sen. In: KLIWA-Heft 10, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, S. 211 – 222.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburg.
- BRETSCHNEIDER H., LECHER K., SCHMIDT M. (1993): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, o.O., 7.Auflage, Paul Parey.
- BUCHHOLZ, O. & SCHITTHELM, D. (2005): Aspekte der Entscheidungsunterstützung in der Praxis; Gegenwärtige Methoden und zukünftiger Bedarf am Beispiel eines Wasserverbandes. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 229-232.
- BUCK, W. (2005): Bereitstellung von Informationen bei wasserwirtschaftlichen Problemstellungen. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 191-198.
- BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin.
- BUNGE, T.; DIRBACH, D.; DREHER, B.; FRITZ, K.; LELL, O.; RECHENBERG, B.; RECHENBERG, J.; SCHMITZ, E.; SCHWERMER, S.; STEINHAEUER, M.; STEUDTE, C.; VOIGT, T. (2001): Wasserkraftanlagen als erneuerbare Energiequelle – rechtliche und ökologische Aspekte, Berlin, S. 71, 87.
- CASPARY, H. J. & BARDOSSY, A. (1995): Markieren die Winterhochwässer 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaveränderungen. In: Wasser & Boden, 47.Jahrgang, 3/1995. S.18 – 24.
- CASPER, M.; GRIMM-STRELE, J.; GUDERA, T.; KORTE, S.; LAMBRECHT, H.; SCHNEIDER, B.; RINAUDO, J. D.; GRAVELINE, N.; VON DIJK, P.; FINCK, M. (2005): Das EU-Projekt MoNit: Entscheidungshilfesystem zur Bewertung der Wirkung von Maßnahmen und veränderten Rahmenbedingungen auf die Nitratbelastung des Grundwassers im Oberrheingraben: Modellkopplung und Szenarienabbildung. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 127-135.
- CCSM (2009): Community Climate System Model - Overview. <http://www.ucar.edu/communications/CCSM/overview.html>. Zugriff am 06.10.2009.
- CESR (2009): Center for Environmental Systems Research. GLOWA-Danube – Modellierung typischer Wassernutzer im Einzugsgebiet der Donau. http://www.usf.uni-kassel.de/cesr/index.php?option=com_project&task=view_detail&agid=17&lang=de. Zugriff am 23.09.2009.
- CLAUSSEN, M. (2009): 7th COSMOS – General Assembly. Präsentation an der 7-ten COSMOS GA vom 15.06.2009 in Berlin. http://cosmos.enes.org/The-7th-COSMOS-GA-in-Berlin-June-15-17-2009.623.0.html?&no_cache=1. Zugriff am 06.10.2009.
- COSMOS (2009a): Models & Standards. <http://cosmos.enes.org/Models-Standards.121.0.html>. Zugriff am 06.10.2009.

- COSMOS (2009b): Welcome – About the COSMOS Network. <http://cosmos.enes.org/Welcome.110.0.html>. Zugriff am 06.10.2009.
- CRUEGER, T.; ROECKNER, E.; RADDATZ, T.; SCHNUR, R. (2007): Klimaänderung vermindert CO₂-Aufnahme des Ozeans. http://meetings.copernicus.org/dach2007/download/DACH2007_A_00242.pdf. Zugriff am 01.10.2009.
- DANSGAARD, W.; JOHNSEN, S.J.; CLAUSEN, H.B.; DAHL-JENSEN, D.; GUNDESTRUP, N.S.; HAMMER, C.U.; HVIDBERG, C.S.; STEFFENSEN, J.P.; SVEINBJORNSDOTTIR, A.E.; JOUZEL, J.; BOND, G.C. (2003): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, S. 218-220.
- DEY, P. K. (2002): Project Risk Management: A combined Analytic Hierarchy Process and Decision Tree Approach. In: *Cost Engineering*, 44, H. 3, S. 13-25.
- DIETRICH, J. & SCHUMANN, A. (2005): Interaktive multikriterielle Analyse zur Abwägung von Alternativvorschlägen für ein Maßnahmenprogramm zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie am Beispiel des Werra-Flusseinzugsgebietes. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005*, Heft 10.05, Hefen, S. 79-87.
- DIETRICH, J. (2006): Entwicklung einer Methodik zur systemanalytischen Unterstützung adaptierbarer Entscheidungsprozesse bei der integrierten Flussgebietsbewirtschaftung. Dissertation. Bochum.
- DISSE, M.; PAKOSCH, S.; YÖRÜK, A.; BÁRDOSSY, A.; BLIEFERNISCHT, J.; GRUNDMANN, J.; HERBST, M.; MOLNAR, T. (2008): HORIX – Development of an operational expert system for flood risk management considering prediction uncertainty, Toronto.
- DVWK (1989): Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Nutzwertanalytische Ansätze zur Planungsunterstützung und Projektbewertung. Bearbeiter: W. Pflüger, DVKW-Mitteilung Heft 19. Bonn. S. 64ff.
- DVWK (1996): Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Merkblätter 238/1996. Offenbach.
- DWD (2009): Deutscher Wetterdienst. Klimaszenarien. Einblicke in unser zukünftiges Klima. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_start&T99803827171196328354269gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FHomepage%2FKlimawandel%2FKlimawandel__neu__Klimaszenarien__node.html__nnn%3Dtrue. Zugriff am 06.10.2009.
- DWD (2010): Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_menu2_leistungen_az_freiemetinfos&T115202758871200642573928gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadatenzentren%2FNKDZ%2FKldaten__akt%2Fbeschreibung__mittelwerte__node.html__nnn%3Dtrue. Zugriff am 07.01.2010.
- DYER, J. S. (1990): Remarks on the Analytic Hierarchy Process. In: *Management Science*, 36, H. 3, S. 249-258.
- EISENFÜHR, F. & WEBER, M. (2003): *Rationales Entscheiden*, 4. Auflage, Berlin et al.
- ENDLICHER, W. & GERSTENGARBE, F.-W. (2007): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam. S. 49.

- EUROPÄISCHE PARLAMENT (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L 327 vom 22.12.2000. Straßburg.
- EVERS, M. (2005): Hochwasser bezogene DSS im europäischen Nordseeraum – Ergebnisse einer Inventarisierung im Rahmen des EU Interreg-Projektes FLOWS. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 147-156.
- EVSA (2009): Entomologen-Vereinigung Sachsen-Anhalt e.V., http://www.evsa.de/entomologie/besonderheiten/salziger_see.htm, Zugriff am 06.07.2009.
- FINK, M.; KRALISCH, S.; BECKSTEIN, C.; MAUDEN, R. (2003): Das Entscheidungsunterstützungssystem IWES und sein Einsatz bei der Thüringer Talsperrenverwaltung. In: KA-Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 2. Hennef. S. 202-206.
- FORSCHUNGSZENTRUM WALDÖKOSYSTEME (2008): Decision Support System Wald und Klimawandel – DSS-WuK. <http://www.dss-wuk.de/>. Zugriff am 23.09.2009.
- FRANKE, J. ; GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. (2006): Risiken des regionalen Klimawandels in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. *Wiss. Zeitschrift der TU Dresden* 55.
- FUCHS, E. (2005): Das öko-hydrologische Modellsystem INFORM – Hilfsinstrument für flussbegleitende Planungen. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 111-118.
- GERLINGER, K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. In: KLIWA-Heft 4: "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft -Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 3. und 4.5.2004 in Würzburg", S.93 - 100.
- GERSTENGARBE, F.-W.; BADECK, F.; HATTERMANN, F.; KRYSANOVA V.; LAHMER, W.; LASCH, P.; STOCK, M.; SUCKOW, F.; WECHSUNG, F.; WERNER, P. C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven, PIK Report No. 83, Potsdam.
- GÖTTLE, A. (2008): Konsequenzen für die wasserwirtschaftliche Infrastruktur, In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 24.08, Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?, Hennef, S. 157.
- GREEN, W. H. & AMPT, G. A. (1911): Studies of soil physics. Part 1. The flow of air and water through soils. *J. Agricultural Soc.*, 4: S. 1-24.
- GRÜNEWALD, U. (2005): „Entscheidungsstützung mit System“ oder/und „Entscheidungsstützungssysteme“?. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 11-18.
- HAACKH, F. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung, In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 24.08, Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?, Hennef, S. 14, 175.

- HAEDRICH, G.; KUß, A.; KREILKAMP, E. (1986): Der Analytic Hierarchy Process. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium 3, S. 120-126.
- HAIMES, Y.Y. (1998): Risk Modeling, Assesment, and Management, John Wiley & Sons.
- HARKER, P. T. & VARGAS, L. (1987): The Theory of Ratio Scale Estimation. Saaty's Analytic Hierarchy Process. Management Science 333, p. 1383-1403.
- HARKER, P. T. (1989): The Art of Science of Decision Making: The Analytic Hierarchy Process. In: Golden, B. L. / Wasil, E. A. / Harker, P. T. (Hrsg.): The Analytic Hierarchy Process, Berlin et al., S. 3-36.
- HATTERMANN, F. (2004): Folgen von Klimawandel und Landnutzungsänderungen für den Landschaftswasserhaushalt und die landwirtschaftlichen Erträge. Vortrag GLOWA-Elbe Abschlusskonferenz 15./16. März 2004, Potsdam.
- HENNEGRIFF, W. (2006): Handlungsempfehlungen bei der Festlegung des Bemessungshochwassers in Baden-Württemberg. In: KLIWA-Heft 10, Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, S. 91 – 104.
- HENNEGRIFF, W.; KOLOKOTRONIS, V.; WEBER, H.; BARTELS, H. (2006): Klimawandel und Hochwasser – Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. KA – Abwasser, Abfall 2006 (53) Nr.8. S.777 - 778.
- HENNEGRIFF, W.; KOLOKOTRONIS, V.; IHRINGER, J. (2007): Prognose der künftigen Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg infolge des Klimawandels. In: Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007; Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 20.07, Band2. Poster. S. 95 - 98.
- HERZOG, C. (2002): Das Methodenpaket IeMAX mit dem Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS - Entwicklung und Anwendung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die integrative Raumplanung. Dissertation. Kiel.
- HND (2009): Hochwassernachrichtendienst Bayern. Pegel im Donaugebiet: Kempten/Iller. <http://www.hnd.bayern.de/>. Zugriff am 19.10.2009.
- HOLMBLAD, L. P. & ØSTERGAARD, J. (1982): Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, In: M. M. Gupta und E. Sanchez, Fuzzy Information and Decision Process, 389-400. North-Holland, Amsterdam
- HORCHLER, P.J.; WINTERSCHIED, A.; HÜBNER, C.; FUCHS, E.; OSTROWSKI, M. (2008): Das nofdp-IDSS – ein interaktives Planungsinstrument zur Realisierung eines naturverträglichen Schutzes vor Hochwasserschäden. Wasserwirtschaft 03/2008. Wiesbaden. S. 43-45.
- HORLACHER, H.-B. (2008): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung, In: DWA-Expertengespräch – Folgen des Kimawandels und Handlungsoptionen der deutschen Wasserwirtschaft, Siegburg.
- HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C.A. (2001): Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 944 pp.
- HUMMELTENBERG, W. & PRESSMAR, P. (1989): Vergleich von Simulation und mathematischer Optimierung an Beispielen der Produktions- und Ablaufplanung. OR-Spektrum (11), S. 217-229.

- HWANG, C.-L. & YOON, K. (1981): Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications, Berlin et al.
- IHRINGER, J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasserstatistik. In: KLIWA-Heft 4: "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft -Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 3. und 4.5.2004 in Würzburg" .S.157 - 158,166.
- IPCC (2000): Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Special Report – Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. S. 4f.
- IPCC (2001a): Intergovernmental Panel on Climate Change. Autoren und Experten-Gutachter, Glossar, Abkürzungen, Akronyme, Einheiten, Liste der wichtigsten IPCC Berichte.
- IPCC (2001b): Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers. IPCC Third Assessment Report. S.33.
- IPCC (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change. Klimaänderung 2007. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Bern, Wien, Berlin. S. 18.
- IPCC (2009): Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I: The Scientific Basis. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/531.htm>. Zugriff am 18.11.2009.
- IPCC (2010): Intergovernmental Panel on Climate Change. The IPCC Data Distribution Centre. http://www.ipcc-data.org/is92/gfdlr15_download.html. Zugriff am 14.01.2009.
- JACOB, D.; GÖTTEL, H.; KOTLARSKI, S.; LORENZ, P.; SIECK, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau.
- JACOBY, C. & KISTENMACHER, H. (1998): Planungsprozess und Entscheidung, Bewertungs- und Entscheidungsmethoden. In: Methoden und Instrumente räumlicher Planung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL). Hannover.
- JULICH, S. & FRÜHAUF, M. (2007): Auswirkungen bergbaulicher Aktivitäten auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Tagebaus Amsdorf. In Hallesches Jahrb. Geowiss., Band 29, S. 93-106, Halle.
- KADEN, S. & KALTOFEN, M. (2004): Wasserbewirtschaftungsmodelle als Instrument für die Planung eines nachhaltigen Niedrigwassermanagements. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Niedrigwassermanagement. Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz. Heft 07.04, Hennef, S. 75-94.
- KASANG, D. (2009): http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Zuk%C3%BCnftige_Treibhausgas-_und_Aerosolkonzentrationen. Zugriff am 12.10.2009
- KEIL, M.; KIEFL, R.; STRUNZ, G. (2005): CORINE Land Cover 2000 - Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landnutzungsdaten für Deutschland. Abschlussbericht zum F+E Vorhaben UBA FKZ 201 12 209, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum Oberpfaffenhofen, Mai 2005.
- KEUP-THIEL, E. & WUNRAM, C. (2007): Regionale Klimasimulationen am World Data Center for Climate (WDCC). Service Gruppe Anpassung – SGA Hamburg. MPI. Hamburg.
- KLAPPER, H. (2000): Wiederherstellung des Salzigen Sees bei Seeburg – Erwartungen, Belas-

- tungen, Prognosen. In: Wasser und Boden, Heft 3, S. 22-30, Berlin.
- KLIWA (2002): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA Projekt A 2.1.3, KLIWA-Berichte, Heft. 2 S.53.
- KLIWA (2003): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA Projekt A 2.1.2, KLIWA-Berichte, Heft 3. S.48.
- KLIWA (2006): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte, Heft 9. Mannheim. S. 9ff.
- KLIWA (2007): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee . KLIWA-Berichte Heft 11. S. 34f.
- KLIWA (2009): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Klimawandel im Süden Deutschlands, Ausmaß-Folgen-Strategien. Mainz.
- KOEHLER, G.M.; SCHWAB, W.; FINKE, W.; BELZ, J.U. (2007): Überblick zur Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland: Ursachen-Wirkungen-Folgen. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 3, Juni 2007. S.118-130.
- KOFALK, S.; JÄHRLING, K.-H.; SCHULZ, S.; UHLMANN, H.-W.; WIEMANN, O.; BOER, S. (2005): Möglichkeiten für den Einsatz eines DSS an Beispielen im Elbegebiet. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 251-254.
- KOFALK, S.; BOER, S.; DE KOK, J.-L.; MATTHIES, M.; HAHN, B. (2009): Ein Decision Support System für das Einzugsgebietsmanagement der Elbe. http://www.bafg.de/nn_163326/DE/02__Aufgabenfelder/03__Oekologie/01__Abteilung__Referate/U2__Ordner/Elbe-DSS,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Elbe-DSS.pdf. Zugriff am 23.09.2009.
- KOM (2009): Kommission der europäischen Gemeinschaften. Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen. Weissbuch. Brüssel.
- KOMPASS (2009): Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung. Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Kurzzusammenfassung. http://www.anpassung.net/cln_110/nn_700714/DE/Anpassungsstrategie/anpassungsstrategie__node.html?__nnn=true&__nnn=true#doc1467984bodyText1. Zugriff am 10.11.2009.
- KRAFT, D. (2005): Aufbau eines Entscheidungsunterstützungssystems für das Küstenzonenmanagement: Konzeption und Entwicklung eines DSS aus küsten-ökologischer Sicht. <http://www.krim.uni-bremen.de/poster/dssinoekologie.pdf>. Zugriff am 23.09.2009.
- KRAHE, P. & BUSSKAMP, R. (2003): Flussgebiete. In: Hydrologischer Atlas von Deutschland, Oberirdische Gewässer, Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Projektleitung: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i.Br.. S. 136.
- KROPP, J.; HOLSTEN, A.; LISSNER, T.; ROITHMEIER, O.; HATTERMANN, F.; HUANG, S.; ROCK, J.; WECHSUNG, F.; LÜTTGER, A.; POMPE, S.; KÜHN, I.; COSTA, L.; STEINHÄUSER, M.; WALTHER, S.; KLAUS, M.; RITCHIE, S.; METZGER, M. (2009): Klimawandel in

- Nordrhein-Westfalen, Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren – Abschlussbericht. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam. S.3.
- KÜCHLER W. (2005): Klimawandel in Sachsen – Sachstand und Ausblick, Dresden, S. 75, 90, 91.
- LAHMER, W. (2003): Konzeption eines DSS zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. In: KA-Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 2. Hennef. S. 179-188.
- LANGE, A. & EGGELSMANN, F. (2007): Klimawandel und Wasserwirtschaft im Harz. http://www.bwk-niedersachsen.de/Veranstaltung29/download/Lange_HWW.pdf. Zugriff am 10.11.2009.
- LAUTERBACH, D. et al. (1978): Prognose der Entwicklung der Wasserressourcen und deren Nutzung in der DDR und der daraus abgeleiteten Entwicklung von Wissenschaft und Technik, Berlin.
- LAUX, H. (1998): Entscheidungstheorie, 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin. S. 23.
- LAWA (1992): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen, München.
- LAWA (2005): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), München.
- LEICHTFUß, A.; SCHRÖTER, K.; OSTROWSKI, M.; PETERS, C.; MÜHLECK, R.; JEKEL, M.; THIEL, E.; SCHMIDT, W.; SIEKER, H. (2003): Entwicklung eines Decision Support Systems für die integrierte wasserwirtschaftliche Planung in kleinen Einzugsgebieten. In: KA-Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 2. Hennef. S. 213-217.
- LEUNER, M.; PÖHLER, H.; SCHERZER, J. (2009): Vorhaben KLIWA-B.2.2.8: Simulation der Gewässergüte unter Berücksichtigung des Klimawandels – Vorstudie über Lösungsansätze zur Modellierung der Gewässertemperaturen für Flussgebiete unter Verwendung von WaSiM-ETH – Zwischenbericht. Nicht veröffentlicht.
- LEVY, J. K. (2005): Multiple criteria decision making and decision support systems for flood risk management. In: Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Jg. 19, S. 438-447.
- LIGHTHILL, M. H. & WHITHAM, G. B. (1955): On kinematic waves. 1. Flood movement in long rivers. Proc. Royal Society London Series A, 229: S. 281-316.
- LINGNAU, V.; JONEN, A. SAGAWA, C. (2007): Beiträge zur Controlling-Forschung – Aufbau eines kognitionsorientierten Risikocontrollinginstrumentes: Unterstützung der Risikobewertung mittels des Analytic Hierarchy Process, Nr. 12, Kaiserslautern. S. 5ff, 17ff.
- LIPPE, W.-M. (2006): Soft-Computing mit Neuronalen Netzen, Fuzzy-Logic und Evolutionären Algorithmen, Berlin Heidelberg. S. 245, 334-337.
- LUA (2006): Landesumweltamt Brandenburg. Daten zum integrierten Klimaschutzmanagement im Land Brandenburg, Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft Nr. 104., S.55-57.
- LUKASIEWICZ, J. (1957): Aristoteles syllogistic: From the standpoint of modern formal logic. Clarendon Press Oxford, 2. Ed.
- LUSTI, M. (2002): Date warehousing und date mining – eine Einführung in entscheidungsun-

- terstützende Systeme. Berlin. S. 22, 37.
- MAMDANI, E. H. (1974): Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant. Proc. of the IEEE, Volume 121, pp. 1585-1588
- MAMDANI, E. H. (1975): An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int. Journal of Man-Machines Studies 7, pp. 1-13.
- MANN, H.-U.; RATZENBERGER, R.; SCHUBERT, M.; KOLLBERG, B.; GRESSER, K.; KONANZ, W.; SCHNEIDER, W.; PLATZ, H.; KOTZAGIORGIS, S.; TABOR, P. (2001): Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung, http://www.bmvbs.de/Anlage/original_5914/Deckblatt-und-Inhaltsverzeichnis.pdf, Kurzfassung, S. IV, XIV.
- MEHL, D.; HOFFMANN, T.; HELBIG, H. (2009): Bestimmung der morphologischen Auen in Sachsen-Anhalt mithilfe eines Fuzzylogik-Ansatzes. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft – Wasser, Boden, Natur, Heft 12/09. Hennef.
- MEIXNER, O. & HAAS, R. (2002): Computergestützte Entscheidungsfindung. Expert Choice und AHP – innovative Werkzeuge zur Lösung komplexer Probleme. Frankfurt / Wien. S. 125, 134, 138-142, 169ff.
- MENZEL, L.; BÜRGER, G.; SCHWANDT, D. (2001): Klimaänderungen und Hochwasser: Ergebnisse aus einer DFNK-Studie im Rheingebiet. Zweites Forum Katastrophenvorsorge 24. – 26. September 2001.
- MENZEL, L. (2004): Umweltmethodik II – Klimamodellierung, Vorlesungsskript 2004, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen an der Universität der Bundeswehr München. Neubiberg. S. 36-46.
- MILLER, G.A. (1956): The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. In: The Psychological Review, Vol. 63, pp. 81-97.
- MORGENSCHWEIS, G. & ZUR STRASSEN, G. (2004): Operationelle Niedrigwasseraufhöhung der Ruhr mit Hilfe von Talsperren. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Niedrigwassermanagement 07.04, Hennef, S. 129-142.
- MORGENSCHWEIS, G. & ZUR STRASSEN, G. (2005): Einsatz eines Decision Support System zur Echtzeitbewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 47-63.
- MOSER, H.; KRAHE, P.; MAURER, T.; NILSON, E. (2008): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 24.
- MPI-M (2006): Max-Planck-Institut für Meteorologie. Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Hamburg. S. 10.
- MPI-M (2009): Max-Planck-Institut für Meteorologie. www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/ueberblick.html. Zugriff am 06.10.2009.
- MUDELSEE, M.; BÖRNGEN, M.; TETZLAFF, G.; GRÜNEWALD, U. (2003): No upward trends in occurrence of extreme floods in central Europe. In: Nature Vol. 425. S. 166 – 168.
- MUDELSEE, M.; DEUTSCH, M.; BÖRNGEN, M.; TETZLAFF, G. (2006): Trends in flood risk of the river Werra (Germany) over the past 500 years. Hydrological Sciences Journal 51 (5).

- S. 818 – 833.
- MUFV (2007): Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz. Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007, S.55-60.
- MUNLV (2007): Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie, Düsseldorf, S. 15 – 18.
- MUNLV (2009): Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Anpassung an den Klimawandel - Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- NACKEN, H. (2006): Regelbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem (Decision Support System, DSS) für die Maßnahmenprogramme gemäß EU-WRRL in NRW. Softwareprodukt. Aachen. Entwicklung eines regelbasierten Entscheidungsunterstützungssystems (DSS) zur ökologischen und wasserwirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmenplänen gemäß EG-WRRL. <http://www.lfi.rwth-aachen.de/index.php?page=water-resources-management-and-environmental-engineering-program>. Zugriff am 23.09.2009.
- NEUMANN, J. & GUDERA, T. (2006): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. In: KLIWA-Heft 10, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, S. 163 – 173.
- NITZSCH VON, R. (1992): Entscheidung bei Zielkonflikten – Ein PC-gestütztes Verfahren, Wiesbaden. S. 33f.
- NOBLE, E. E. (1990): Consistency in the Analytic Hierarchy Process, Michigan. S. 14.
- OKE, T. R. (1987): Boundary layer climates. Second Edition, Routledge, London and New York, 416 pp.
- OSSADNIK, W. (1998): Mehrzielorientiertes strategisches Controlling. Methodische Grundlagen und Fallstudien zum führungsunterstützenden Einsatz des Analytischen-Hierarchie-Prozess. Heidelberg. S. 93.
- PAKOSCH, S.; DISSE, M.; BÁRDOSSY, A. (2008): Entwicklung eines fuzzy basierten Regelsystems für die Hochwasservorhersage, Tag der Hydrologie 2008, Hannover.
- PESCHKE, G. (1977): Ein zweistufiges Modell der Infiltration von Regen in geschichtete Böden. Acta hydrophys., 22 (1): S. 39-48.
- PESCHKE, G. (1987): Soil moisture and runoff components from a physically founded approach. Acta hydrophys., 31 (3/4): S. 191-205.
- PETRY, D.; BRÄUER, I.; KLAUER, B.; RODE, M.; WAGENSCHHEIN, D. (2005): Strukturierung und Unterstützung des Entscheidungsprozesses zur Aufstellung von Maßnahmenprogrammen nach WRRL. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 89-101.
- PINNEKAMP, J.; KÖSTER, S.; SIEKMANN, M.; STAUFER, P. (2008): Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft. In: 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Aachen, S. 3/2.
- POHL, H.-C. (1976): Praktische Relevanz von Entscheidungstechniken. In: Die Unternehmung (Schweizerische Zeitschrift für Betriebswirtschaft), Heft 2, S. 73-93.

- PÖHLER, H., JASPER, K., MÜLLER, M., SCHERZER, J. (2008): KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 13-0345.42/312. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- RENN, O. & WEBLER, T. (1998): Der kooperative Diskurs - Theoretische Grundlagen, Anforderungen, Möglichkeiten. In: O. Renn, H. Kastenholz, P. Schild and U. Wilhelm (Hrsg.): Abfallpolitik im kooperativen Diskurs. Bürgerbeteiligung bei der Standortsuche für eine Deponie im Kanton Aargau. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S.3-103.
- REICHARDT, T. (2003): Mehrkriterielle Entscheidungen mit dem AHP-Verfahren, im Rahmen der Veranstaltung: Seminar zur Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre, Halle-Wittenberg. S. 5-17.
- REUBER, J. & VON HENGEL, W. (2005): Der Baukasten Maas – ein DSS zur Vorbereitung auf die Klimaentwicklung in diesem Jahrhundert. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 37-46.
- RICHARDS, L.A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Phys.*, 1, 318-333.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Berichte des deutschen Wetterdienstes 194, Offenbach.
- ROECKNER, E.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U.; TOMPKINS, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology, Report 349. Hamburg.
- ROMMELFANGER, H. & EICKEMEIER, S. H. (2002): Entscheidungstheorie: klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen, Berlin. S. 154f.
- RZD (1986): Regionale Zusammenarbeit der Donauländer. Die Donau und ihr Einzugsgebiet – Eine hydrologische Monographie. Teil 1/ Texte, Teil 2/Tabellen, Teil 3/Karten. – Hrsg. Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft, München und IHP/OHP-Sekretariat, Koblenz. S.19, 22, 166 - 178.
- RZD (2004): Regionale Zusammenarbeit der Donauländer. Die Donau und ihr Einzugsgebiet – Eine hydrologische Monographie. Folgeband VIII/2: Das Abflussregime der Donau und Ihres Einzugsgebietes – Aktualisierung des Kapitels II der Donaumonographie. Hrsg. IHP/UNESCO HWRP/WMO.S.28,46.
- SAATY, T. L. (1977): A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. In: *Jornal of Mathematical Psychology* 15, S. 234-281.
- SAATY, T. L. (1980): *The Analytical Hierarchy Process*. New York et al. S. 53ff.
- SAATY, T. L. (1982): Priority Setting in Complex Problems. In: Hansen, Pierre (ed.). *Essays and Surveys on Multiple Criteria Decision Making*. Berlin: Springer, S. 326-336.

- SAATY, T. L. (1986): Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32, p. 841-855.
- SAATY, T. L. (1990): How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. In: *European Journal of Operational Research* 48, S. 9-26, North Holland Publish.
- SAATY, T. L. (1996): *The Analytic Hierarchy Process – Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, 2. Auflage, Pittsburgh. S. 21.
- SATO, Y. (2001): The impact on scaling on the pair-wise comparison of the analytical hierarchy process. In: Dellmann, K. (Hrsg.): *Proceedings of the Sixth International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, Bern, S. 421-430.
- SCHÄFER, D. & NILLERT, P. (2007): Modellgestützte Abschätzungen zur Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die geogen-salinäre Versalzung im Einzugsgebiet des Wasserwerks Potsdam-Leipziger Str. In: *Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007; Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 20.07, Band 2. Poster*. S. 87 - 90.
- SCHERZER, J.; DISSE, M.; JACOBY, C.; HEINISCH, T.; GRIGORYAN, G.; SCHULTZE, B.; STADELBACHER, V.; NIEDERBERGER, J.; PÖHLER, H. (2010): Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft. *Methodenentwicklung zur Bestimmung der Anpassungskapazität und Vulnerabilität, Anpassungskonzepte für den Wassersektor und Umgang mit Nutzungskonflikten. Endbericht. Dessau-Roßlau (Forschungsvorhaben i. A. des Umweltbundesamtes, FKZ 3707 041 105)*.
- SCHIFFLER, G.; FISCHER-ANTZE, T.; BERNREUTHER, A. (2008): Kühlwassereinleitungen in Fließgewässern unter Extrembedingungen. In: *Beiträge zum Fachkolloquium „Extremereignisse in der Wasserwirtschaft“*, Kaiserslautern.
- SCHNEEWEIß, C. (1991): *Planung 1. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Berlin. S. 93f.
- SCHULLA, J. (1997): *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen*. Dissertation 12018, ETH Zürich, 163 S. http://www.wasim.ch/products/wasim_description.htm. Zugriff am 12.08.2009.
- SCHULLA, J. & JASPER, K. (1998): *Modellbeschreibung WaSiM-ETH (deu. Fassung)*, http://www.wasim.ch/products/wasim_description.htm, Zugriff am 12.08.2009.
- SCHULLA, J. & JASPER, K. (2007): *Modellbeschreibung WaSiM-ETH (engl. Fassung)*. http://www.wasim.ch/products/wasim_description.htm, Zugriff am 12.08.2009.
- SCHULLA, J. & JASPER, K. (2009a): *Das hydrologische Modellsystem WaSiM-ETH, Modellkonzept und Modellstruktur*, http://www.wasim.ch/the_model/concept.htm, http://www.wasim.ch/the_model/structure.htm, Zugriff am 15.09.2009.
- SCHULLA, J. & JASPER, K. (2009b): *Das hydrologische Modellsystem WaSiM-ETH, Lösungen*, <http://www.wasim.ch/solutions.html>, Zugriff am 21.09.2009.
- SCHULZ, M. & RENN, O. (2009): *Das Gruppendelphi. Konzept und Fragebogenkonstruktion*. Wiesbaden.
- SCHWANDT, D. (2003): *Abflussentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins – Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien*. PIK Report No. 88, Potsdam.

- SEELING, S. & SCHÜLER, G. (2005): Water Retention by Land Use (WaReLa) – Entwicklung und Implementierung eines wasserwirtschaftlichen DSS im Rahmen der Gemeinschaftsinitiative Interreg IIIB der EU. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 265-268.
- SEIDL, T.; KRIEGER, R.; ASSENT, I.; GLAVIC, B.; NACKEN, H.; BARTUSSECK, S.; SEWILAM, H. (2005): Data Mining zur Entscheidungsunterstützung in der Hydrologie. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Hennef, Heft 10.05, S. 137-145.
- SEVRUK, B. (1986): Correction of precipitation measurements. Zürcher Geographische Schriften, 23, ETH Zürich.
- SIEKER, H.; FÖRSTER, M.; SCHEIBEL, M.; ZIMMERMAN, U. (2005): DAYWATER - ein Entscheidungshilfesystem für die Bewirtschaftung von Regenwasser. In: Wasserwirtschaft 3/2005. Wiesbaden. S. 15-22.
- SMUL (2005): Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick, Dresden.
- SOMMER, TH.; FEIGE, H.; KLÖCKING, B.; KNOBLAUCH, S.; MAIER, U.; MÜLLER, M.; PFÜTZNER, B.; WECHSUNG, F.; CLAUSING, TH., (2003): Die Wirkung des Globalen Wandels im Unstrut-Einzugsgebiet, Abschlussbericht; GLOWA-Elbe Teilprojekt Unstrut; Förderprojekt des BMBF, Förderkennzeichen: 07 GWK 03, Dresden, S. 126 - 131.
- SPREAFICO, M. & WEINGARTNER, R. (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG, Serie Wasser, Bern 2005, S.124 - 125.
- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2, Potsdam. S. 13f.
- STAFUA OWL (2005): Staatliches Amt für Umwelt und Arbeitsschutz. Hochwasser-Aktionsplan Weser (NRW). S.10, 21.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2006): Bevölkerung Deutschlands bis 2050 – 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung – Presseexemplar, Wiesbaden, S. 6, 7, 15, 19, 55ff.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2007): Statistisches Jahrbuch 2007 für die Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden. S. 301f.
- STAU (1999): Staatliches Amt für Umweltschutz Halle. Wasserbilanz der Mansfelder Seen – Ist-Zustand und Prognose, Unveröffentlicht.
- STEINRÜCKE, J.; VOLLMERDING, J.; WEIBHAUPT, R. (2005): Ein DSS für den Betreiber des Emssperrwerkes. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 57-63.
- STMUGV (2007): Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Klimaprogramm Bayern 2020, München, S. 26.

- STMUG (2009a): Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. Klimaprogramm Bayern 2020, München.
- STMUG (2009b): Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS), München. S. 14f.
- SUGENO, M. (1985): An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences*, Volume 36, S. 59-83
- SUGENO, M. & TAKAGI, T. (1985): Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Transactions of Systems, Man & Cybernetics*, Volume 15, S. 116-132
- TERANO, T.; ASAI, K., SUGENO M. (1991): *Fuzzy System Theory and its Applications*. Academic Press, Boston, MA
- THOMPSON, N.; BARRIE, I. A.; AYLES, M. (1981): The meteorological office rainfall and evaporation calculation system. MORECS (July 1981). *Hydrol. Memorandum*, 45, The Meteor. Office, Bracknell, UK.
- TMLNU (2004): Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. *Umweltschutz in Thüringen*, Erfurt, S. 20f.
- TRAEGER, D. H. (1994): *Einführung in die Fuzzy-Logik*, Stuttgart. S. 71-89.
- UBA (2005): Umweltbundesamt. *Umweltpolitik. Die Wasserrahmenrichtlinie – Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland*. S. 19. Berlin.
- UBA (2007): *Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG*, Hintergrundpapier, Dessau. S. 2f.
- UBA (2009): Umweltbundesamt. *Daten zur Umwelt. Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen*. <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2348>. Zugriff am 13.10.2009
- WDC (2008): World Data Center for Climate, Hamburg. <http://cera-www.dkrz.de/CERA/index.html>. Zugriff März 2008.
- WEBER, K. (1993): *Mehrkriterielle Entscheidungen*. Wien/München. S. 85-95.
- WEBER, H. (2006): *Untersuchungsergebnisse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Süddeutschland* In: KLIWA-Heft 10, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, S. 131 – 143.
- WEBLER, TH.; LEVINE, D.; RAKEL, H.; RENN, O. (1991): The Group Delphi: A Novel Attempt at Reducing Uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 39, No. 3, S. 253-263.
- WECHSUNG, F.; HANSPACH, A.; HATTERMANN, F.; WERNER, P.C.; GERSTENGARBE, F.-W. (2006): *Klima- und Anthropogene Wirkung auf den Abfluss der mittleren Elbe, Konsequenzen für Unterhaltungsziele und Ausbaunutzen*. PIK. S.7, 45.
- WEIB, G. (2000): *Die Siedlungs- und Nutzungsgeschichte der Landschaft der Mansfelder Seen*. In: LAU LSA Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, *Naturschutz im Land Sachsen-Anhalt – Der Salzige See*, S. 8-16, Sonderheft, Halle.
- WILLE, B. & SPIES, K.-H. (2005): *Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft (FluGGS)*. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall*. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Heft 10.05, Hennef, S. 73-78.

- WILLEMS, W. (2006): Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Süddeutschland. In: KLIWA-Heft 10, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, S. 143 – 161.
- WOLFF, M. (2003): Hochwasserrisiko im mittleren Neckarraum: Charakterisierung unter Berücksichtigung regionaler Klimaszenarien sowie dessen Wahrnehmung durch befragte Anwohner. PIK Report No. 87, Potsdam.
- WUPPERVERBAND (2008): Fische in der Wupper, [http://www.wupperverband.de/internet/wupperverbandwys.nsf/files/2008_flyer_wupper_fische_lang_2.pdf/\\$FILE/2008_flyer_wupper_fische_lang_2.pdf](http://www.wupperverband.de/internet/wupperverbandwys.nsf/files/2008_flyer_wupper_fische_lang_2.pdf/$FILE/2008_flyer_wupper_fische_lang_2.pdf), Zugriff: 18.06.2009.
- WURBS, D. (2005): Vergleichende Untersuchungen zu den Folgewirkungen zu Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt in Flusseinzugsgebieten, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, S. 84 - 92.
- YOUKHANA, E.; ARENDT, B.; BHARATI, L.; PLOTNIKOVA, M.; RODGERS, C.; VLEK, P. (2005): Das GLOWA-Volta-Projekt - Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für nachhaltiges Wassermanagement im Westafrikanischen Voltabecken. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – Von der Theorie zum Anwendungsfall. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, Hennef, Heft 10.05, S. 183-190.
- ZADEH, L. A. (1965): Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- ZADEH, L. A. (1972): A rationale for fuzzy control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Volume 94 (6), S. 3-4.
- ZADEH, L. A. (1973): Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, Volume 3, S. 28-44.
- ZALF (2008): Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung. LandCaRe-DSS – ein interaktives, modellgestütztes Wissens- und Entscheidungsunterstützungssystem für die Klimaanpassung der Landwirtschaft. http://www.gil.de/dokumente/berichte/DDD/R21_2009_4.pdf. Zugriff am 23.09.2009.
- ZANGEMEISTER, C. (1970): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, Wittemann, München.
- ZEBISCH, M.; GROTHMANN, T.; SCHRÖTER, D.; HASSE, C.; FRITSCH, U.; CRAMER, W. (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt. *Climate Change* 08/05. Dessau. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/dateien/2947.htm>. Zugriff am 12.10.2009.
- ZIMMERMANN, H.-J. & GUTSCHE, L. (1991): Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidung bei Mehrfachzielsetzung. Berlin. S. 21, 65-78.
- ZIMMERMANN, H.-J. (1993): Fuzzy Technologien – Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale, Düsseldorf. S. 8, 64, 209f.

Anhang

A.1. Kohlendioxidkonzentrationen der SRES-Szenarien

In folgender Tabelle A 1 sind die Kohlendioxidkonzentrationen verschiedener SRES-Szenarien bis zum Jahr 2100 dargestellt.

Tabelle A 1: Kohlendioxidkonzentrationen (CO₂-Konzentration) in [ppm] nach den SRES-Szenarien (ISAM model reference) (IPCC 2010)

Jahr	A1B	A1T	A1FI	A2	B1	B2	IS92a
1970	325	325	325	325	325	325	325
1980	337	337	337	337	337	337	337
1990	353	353	353	353	353	353	353
2000	369	369	369	369	369	369	369
2010	391	389	389	390	388	388	390
2020	420	412	417	417	412	408	415
2030	454	440	455	451	437	429	444
2040	491	471	504	490	463	453	475
2050	532	501	567	532	488	478	508
2060	572	528	638	580	509	504	543
2070	611	550	716	635	525	531	582
2080	649	567	799	698	537	559	623
2090	685	577	885	771	545	589	670
2100	717	582	970	856	549	621	723

A.2. Klimatische Wasserbilanzkarten

A.2.1. Niederschlagskorrektur nach Richter

Da die wirkliche Niederschlagshöhe durch das Messsystem verfälscht wird, ist es notwendig die gemessenen Niederschlagswerte zu korrigieren. Die korrigierten Werte geben den wirklich am Erdboden ankommenden Niederschlag an. Die Korrektur der täglichen Niederschlagswerte erfolgt nach der von RICHTER (1995) angegebenen Gleichung:

$$N_{\text{korr}} = N + b \cdot N^\varepsilon \quad \text{Gleich. (5.1)}$$

N ist dabei die tägliche gemessene und N_{korr} die korrigierte Niederschlagshöhe. Die Koeffizienten b und ε sind abhängig von der Niederschlagsart und der Stationslage. Sie können Tabelle A 2 entnommen werden. Die Niederschlagsart N4 (flüssig) wird bei einer Temperatur von über 3 °C (Tagesmittel) angenommen, dabei muss nach Sommer (Mai – Oktober) und Winter (November – April) unterschieden werden. Die Niederschlagsart N8 ist eine Mischung aus flüssigem und festem (Schnee-) Niederschlag und ergibt sich in einem Temperaturbereich zwischen –0.7 und +3.0 °C. Liegt das Tagesmittel der Temperatur unter –0.7 °C so liegt fester Niederschlag N7 vor. Da nicht immer für alle Stationen Angaben zur Stationslage vorliegen, werden diese ggf. nach der mittleren langjährigen Windgeschwindigkeit eingestuft (Tabelle A 2). Wenn auch diese nicht vorliegt, wird die Station als „mäßig geschützt“ bewertet.

Tabelle A 2: Abhängigkeit von ε und b von Niederschlagsart und Stationslage

Niederschlagsart	ε	Stationslage / b			
		frei	leicht geschützt	mäßig geschützt	stark geschützt
N4 (Sommer)	0,38	0,345	0,310	0,280	0,245
N4 (Winter)	0,46	0,340	0,280	0,240	0,190
N8	0,55	0,535	0,390	0,305	0,185
N7	0,82	0,720	0,510	0,330	0,210

Tabelle A 3: Einteilung der Stationslage nach der mittleren langjährigen Windgeschwindigkeit

Windgeschwindigkeit (m/s)	Stationslage
0-2	stark geschützt
2-5	mäßig geschützt
5-8	leicht geschützt
>8	frei

Da bei reinen Niederschlagsstationen zum einen keine Angaben zur Niederschlagsart vorliegen bzw. für die Auswahl der Niederschlagsart in der Regel auch keine Angaben über die Temperatur vorliegen, kann für diese Stationen für begrenzte Gebiete, das Mittel der Temperatur der in diesem Gebiet liegenden Klimastationen verwendet werden.

A.2.2. Berechnung der Verdunstung nach Penman-Monteith

Die Berechnung der Verdunstung erfolgte nach Penman-Monteiths kombinierten Ansatz für eine Gras-Referenzverdunstung nach folgender Gleichung:

$$ETP = \frac{\Delta \cdot R_n^*}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \cdot \frac{90 \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273} \quad \text{Gleich. (5.2)}$$

mit:

- Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]
- R_n^* : Verdunstungsäquivalent der Nettostrahlung [mm/d]
- e_s : Sättigungsdampfdruck [hPa]
- e_a : aktueller Dampfdruck [hPa]
- γ : psychrometrische Konstante $\gamma = 0,65$ hPa/K
- u_2 : Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]
- T : Lufttemperatur [°C]

A.2.3. Berechnung der prozentualen Änderung der klimatischen Wasserbilanz

Änderungen in Prozent geben oft ein verfälschtes Bild wieder. Liegt die klimatische Wasserbilanz im Referenzszenario beispielsweise um den Nullwert, so bewirkt bereits eine geringe Änderung von wenigen Millimetern eine sehr große prozentuale Änderung, wohingegen die absolute Änderung sehr gering ist. Dies tritt bei vorliegenden Daten speziell in Ostdeutschland auf. Daher wurden die absoluten Änderungen in [mm] angegeben (Abbildung 2.14 bis Abbildung 2.16). In den folgenden Abbildungen A.1. bis A.3. ist die absolute klimatische Wasserbilanz bis zum Jahr 2100 dargestellt. Zum Vergleich wurde nach Gleich. (5.3) auch die prozentuale Änderung der klimatischen Wasserbilanz berechnet (Abbildung A.4. bis A.6.).

$$\text{Änderung} = \frac{MW(Z1/Z2) - MW(IST)}{|MW(Z0)|} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Gleich. (5.3)}$$

mit:

- MW = Mittelwert [mm]
- IST = Referenzzeitraum, simulierte Werte aus dem Kontrolllauf, Zeitraum 1971-2000
- Z1 = Nahe Zukunft, Zeitraum 2021-2050
- Z2 = Ferne Zukunft, Zeitraum 2071-2100

A.2.4. Klimatische Wasserbilanzkarten

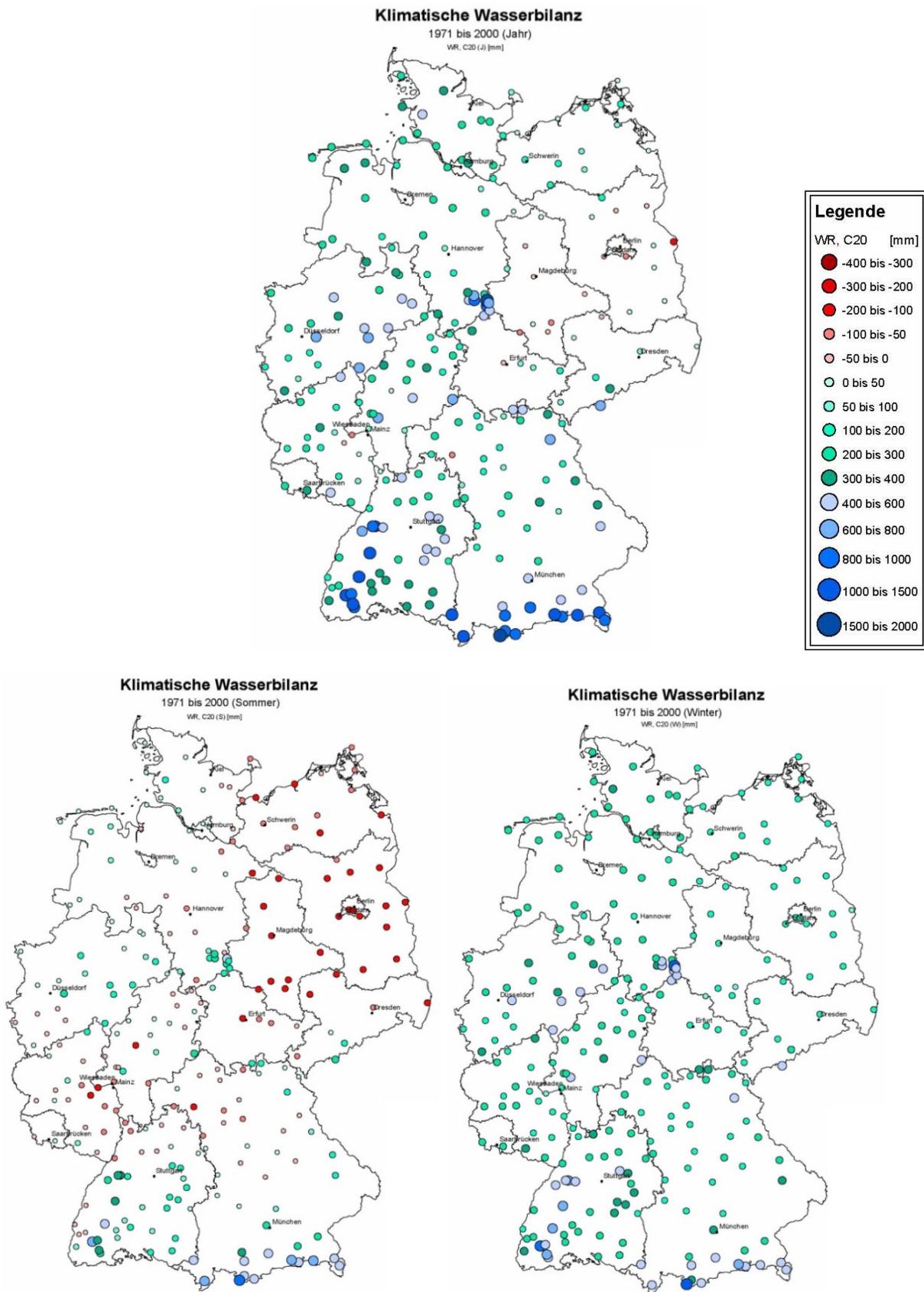


Abbildung A 1: Klimatische Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 1971-2000, WETTREG, Kontrolllauf C20 [mm]

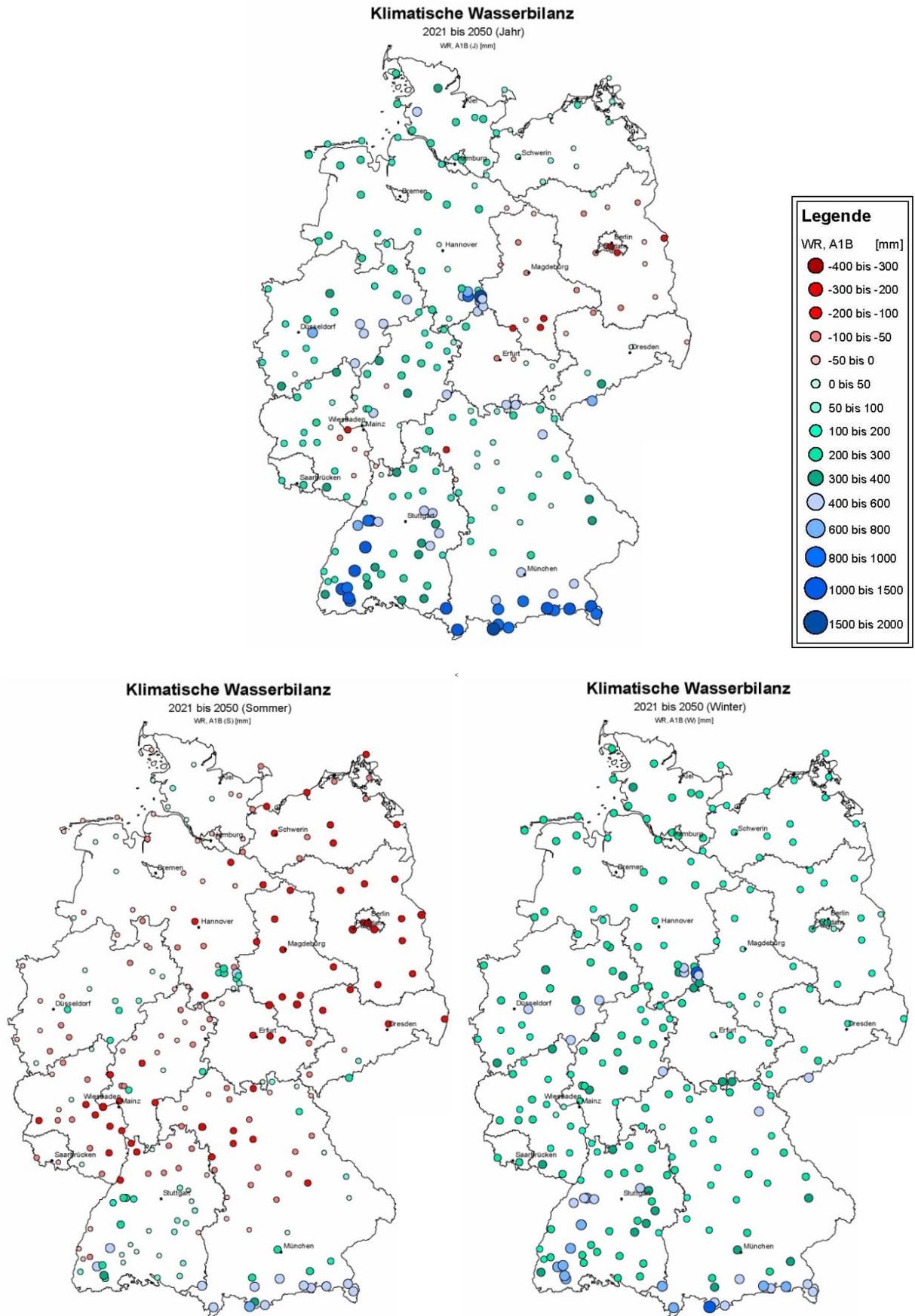


Abbildung A 2: Klimatische Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2021-2050, WETTREG, A1B [mm]

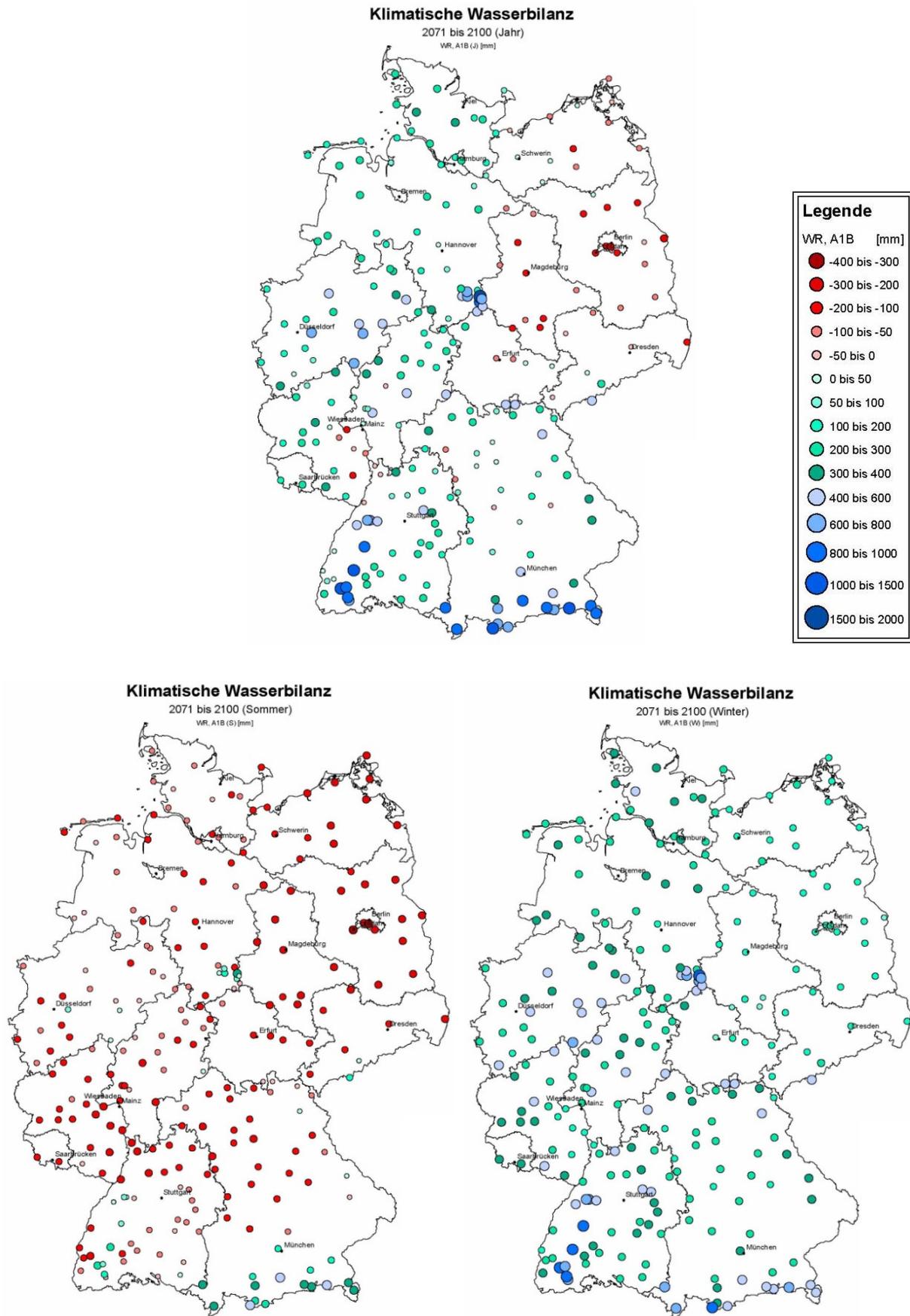


Abbildung A 3: Klimatische Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), Zeitreihe 2071-2100, WETTREG, A1B [mm]

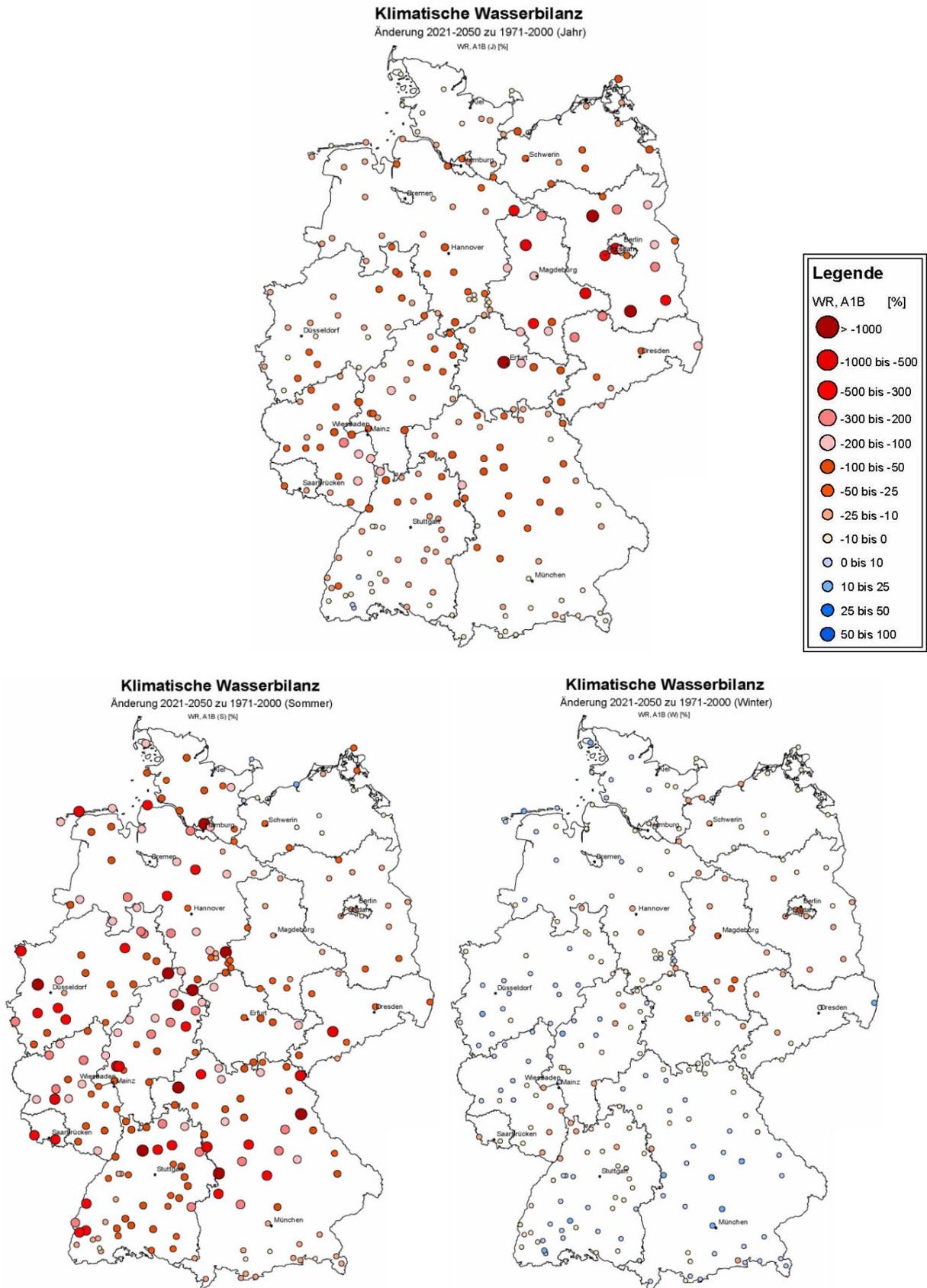


Abbildung A 4: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), 2021-2050 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [%]

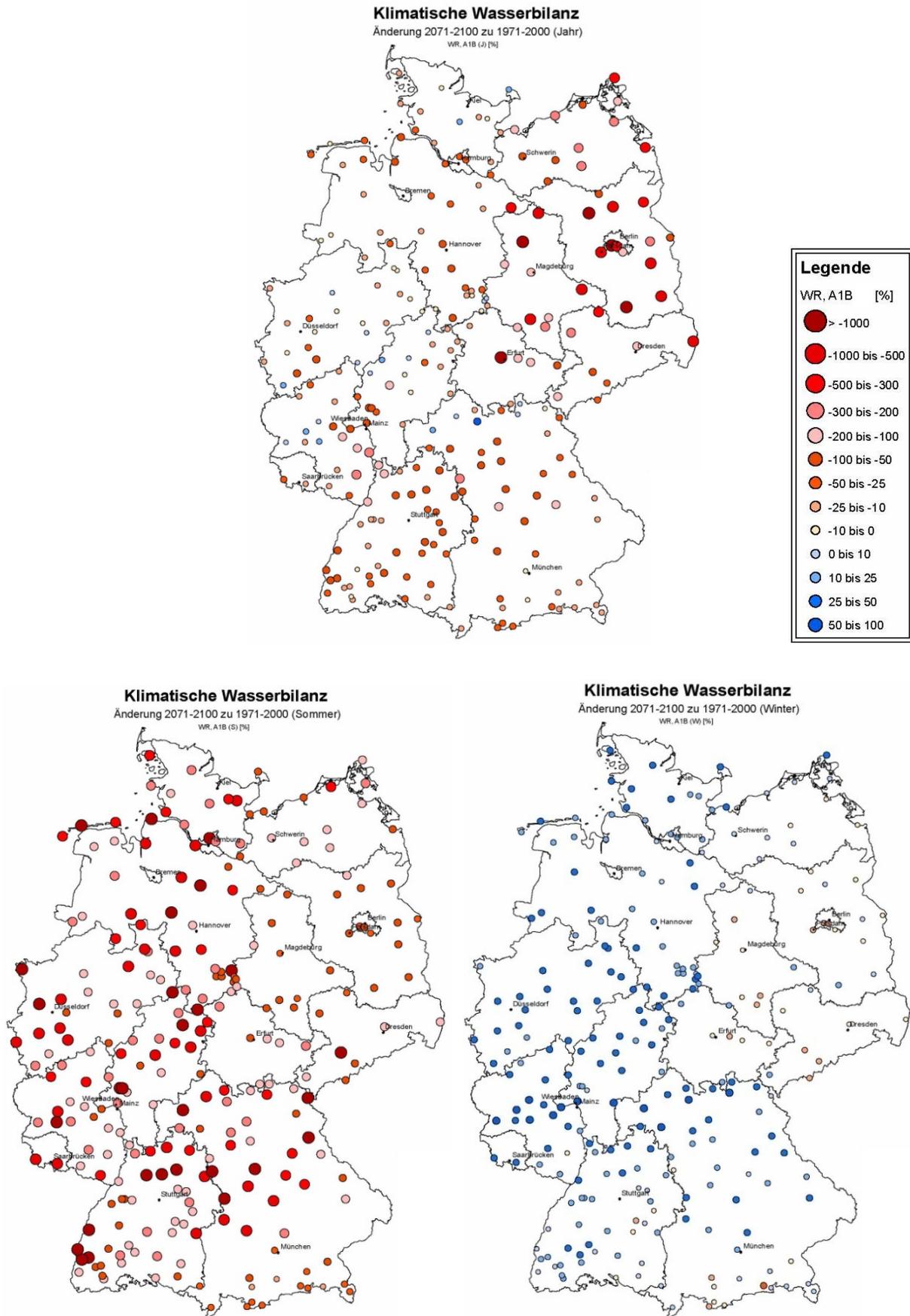


Abbildung A 5: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), 2071-2100 zu 1971-2000, WETTREG, A1B zu C20 [%]

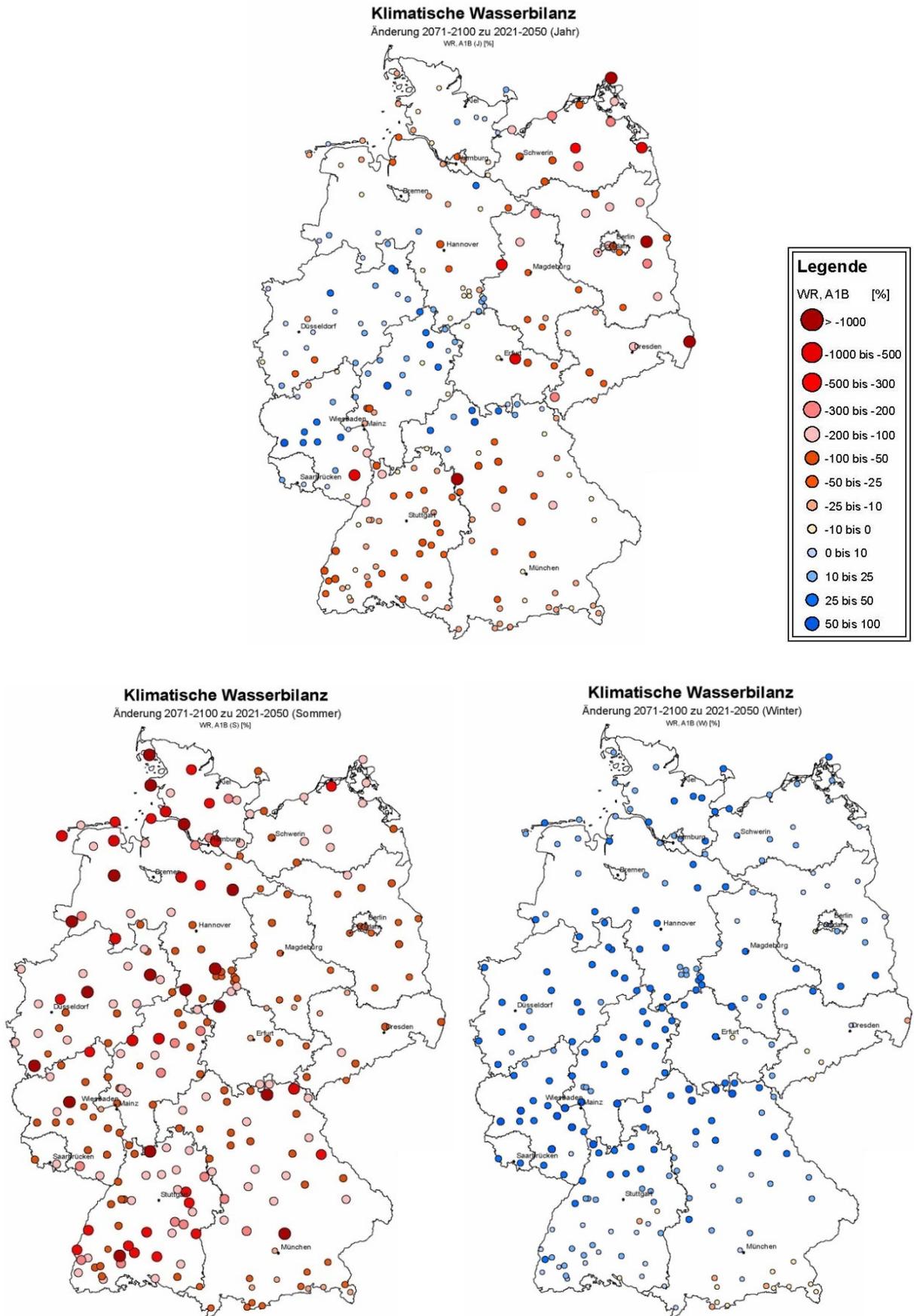


Abbildung A 6: Änderung der klimatischen Wasserbilanz (Jahr, Sommer, Winter), 2071-2100 zu 2021-2050, WETTREG, A1B [%]

A.3. Expertenbefragung

Expertenbefragung

„Entwicklung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel im Einzugsgebiet der Oberen Iller“



Abb. 1: Hochwasser 2005 Sonthofen (Quelle: Stadt Sonthofen)

- Schriftliche Befragung von Experten der Wasserwirtschaft
im Einzugsgebiet der Oberen Iller -



- 1 -

Hinsichtlich des Klimawandels müssen auch im Bereich der Wasserwirtschaft Anpassungsstrategien und konkrete Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden. Dafür ist die Analyse und Bewertung einer Vielzahl von Informationen und Daten erforderlich, die teilweise nur grob abgeschätzt bzw. unscharf erfasst werden können. Ein Entscheidungsunterstützungssystem EUS (Decision Support System = DSS), das neben empirisch abgesicherten Daten auch unsichere Daten wie die zu erwartende Klimaänderung oder sich ändernde gesellschaftliche Rahmenbedingungen berücksichtigt, kann diesen Prozess erleichtern. Im Folgenden wird ein solches System unter dem Namen „WASKlim-EUS“ vorgestellt, das im Rahmen des Forschungsprojektes „Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel“ an der Universität der Bundeswehr entwickelt wurde.

Das „WASKlim-EUS“ ist folgendermaßen aufgebaut (siehe Abbildung 2):

- 1) Wasserhaushaltsmodell
 - a. Ermittlung der hydrologischen Belastung (Klimaszenarien)
 - b. Statistische Auswertung der hydrologischen Belastung
- 2) Zustandsbewertung
 - a. Bewertung des Wasserdargebotes - heute und zukünftig
 - b. Bewertung bzw. Abschätzung des Wasserbedarfs - heute und zukünftig
 - c. Bewertung des heutigen und zukünftigen Zustandes ohne Maßnahmen
- 3) Maßnahmenbewertung
 - a. Bewertung verschiedener, alternativer Anpassungsmaßnahmen
 - b. Maßnahmenbewertung unter Berücksichtigung der Zustandsbewertung

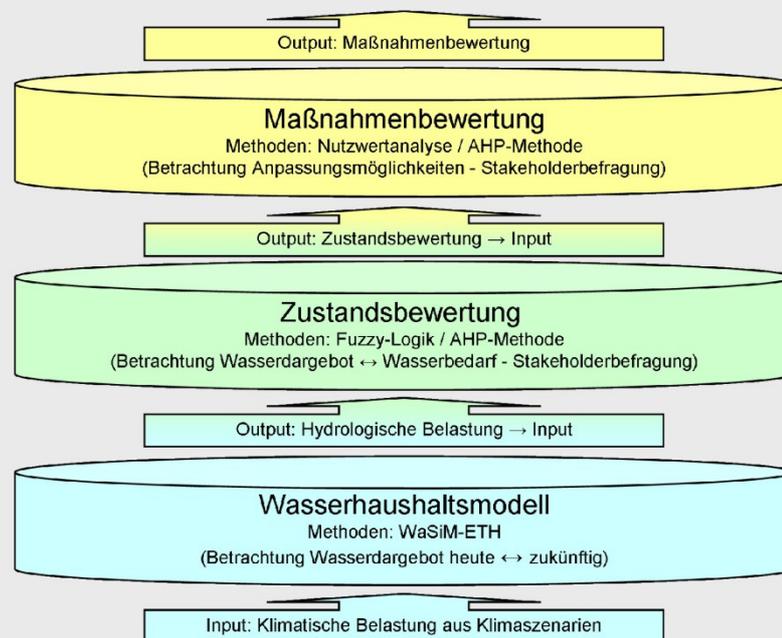


Abb. 2: Aufbauschema des Entscheidungsunterstützungssystems „WASKlim-EUS“

Kurzbeschreibung des „WASKlim-EUS Obere Iller“:

Zustandsermittlung:

Im Vorfeld wurde mit Hilfe des **Wasserhaushaltsmodell** WaSiM-ETH der heutige und zukünftige potenziell natürliche Wasserhaushalt des Einzugsgebiets der Oberen Iller bis Kempten berechnet.

Die daraus resultierenden hydrologischen Kenngrößen wie beispielsweise Mittelwasser- und Niedrigwasserabfluss der Zeitreihen 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 dienen der Zustandsermittlung hinsichtlich des heutigen und zukünftigen **Wasserdargebotes**. Für die Berechnungen wurden die Regionalisierungsmodelle WettReg (= statistisches regionales Klimamodell - feucht / trocken) und REMO (= dynamisches regionales Klimamodell), mit jeweils den IPCC-Szenarien A1B, A2, B1 verwendet. Prinzipiell können aber auch fiktive Klimaszenarien eingegeben werden. Die Bandbreite der so errechneten, zukünftigen hydrologischen Kenngrößen (= Indikatoren) ist nun von Vertretern der verschiedenen Wassernutzungen (Stakeholder) gegenüber der Zeitreihe 1971-2000 im Hinblick auf die Deckung des Wasserbedarfs zu bewerten. Die Bewertungsskala reicht von -3 = äußerst schlecht über -2 = sehr schlecht, -1 = schlecht, 0 = zufriedenstellend, +1 = gut, +2 = sehr gut, +3 = äußerst gut.

Ebenso ist von Vertretern der jeweiligen Wassernutzung der zu erwartende **Wasserbedarf** hinsichtlich der Menge zu bewerten. Hier dienen jedoch keine hydrologischen Kenngrößen als Indikatoren, sondern meteorologische Kenngrößen (Temperatur) und Entwicklungsprognosen hinsichtlich der Bevölkerung und des ökonomischen Strukturwandels. Diese werden als Entwicklungs-Kenngrößen bezeichnet. Die Bewertungsskala reicht hier von -3 = es wird zukünftig sehr viel mehr Wasser benötigt, über -2 = viel mehr, -1 = mehr, 0 = gleich viel, +1 = weniger, +2 = viel weniger bis +3 = es wird sehr viel weniger Wasser als heute benötigt.

Die Ergebnisse aus den Wasserhaushaltsberechnungen (Klimaszenarien) und den Stakeholder-Bewertungen werden anschließend in das „WASKlim-EUS“ eingegeben. Aufbauend auf diesen Klimaszenarien und den Entwicklungsprognosen errechnet das „WASKlim-EUS“ aus dem Vergleich zwischen Wasserbedarf und Wasserdargebot den zukünftigen Zustand ohne Anpassungsmaßnahmen. Dieser Zustand gibt nun Auskunft über den Handlungsbedarf in den jeweiligen Bereichen der Wassernutzung hinsichtlich des Klimawandels.

Beispiel:

Zeigen die Klimaszenarien, dass beispielsweise die Grundwasserneubildungsrate (GWN) zukünftig um 10% abnimmt, so könnte dies für die Wassernutzung „Trinkwasserversorgung aus Grundwasser“ auf Seiten des Wasserdargebotes mit „schlecht“, also mit „-1“ bewertet werden. Eine Erhöhung um 15% könnte mit „+2“ bzw. als „sehr gut“ beurteilt werden. Hingegen könnte der Wasserbedarf aufgrund von sinkenden Bevölkerungszahlen und weiteren Wassersparmaßnahmen rückläufig sein und beispielsweise mit +1, also es wird „weniger“ Wasser zukünftig benötigt, bewertet werden. Werden nun beide Bewertungen zusammengefasst, errechnet sich so der Gesamtzustand unter Berücksichtigung eines konkreten Klimaszenarios.

Methodik:

Mit Hilfe dieser groben Bewertungen (-3 bis +3) wird automatisch vom „WASKlim-EUS“ ein Fuzzy-Entscheidungssystem aufgestellt, das mittels einfacher „Wenn-dann-Regeln“ die Bewertung der Klimaszenarien hinsichtlich des Wasserdargebotes und Wasserbedarfs ermöglicht. Der Vorteil eines Fuzzy-Regelwerkes ist es, dass die vorhandenen Unsicherheiten bei den jeweiligen Bewertungen in das System mit ein fließen und berücksichtigt werden. Dies erfolgt automatisch vom WASKlim-EUS System.

Die Verknüpfung der einzelnen Indikatoren (= hydrologische- und Ereignis-Kenngrößen) erfolgt dabei über eine einfache Gewichtung, die wiederum von den Vertretern der Wassernutzungen anzugeben ist. Unterstützend kann der Analytische-Hierarchie-Prozess (AHP) verwendet werden. Über einfache Paarvergleiche werden dabei Einzelgewichte der Indikatoren ermittelt. Der sogenannte Inkonsistenzfaktor, der einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten darf, gibt dabei Auskunft über die Plausibilität der Bewertungen. Auch diese Berechnung wird automatisch von dem Programm vorgenommen.

Maßnahmenbewertung:

In einem weiteren Schritt können nun die Vertreter der verschiedenen Wassernutzungen konkrete **Anpassungsmaßnahmen** mit Hilfe einer Nutzwert-Analyse bewerten. Die Bewertungsskala verläuft, wie bei der Zustandsermittlung, von „äußerst schlecht (-3)“ bis „äußerst gut (+3)“. Die vorgegebenen Bewertungskriterien sind dabei der Nutzen kurz-/mittelfristig, der Nutzen langfristig, der Beitrag zum Klimaschutz, die Resilienz und die Nutzungskonflikte bzw. die Machbarkeit. Diese Kriterien können ebenfalls frei oder mit Hilfe des Analytischen-Hierarchie-Prozesses (AHP) gewichtet werden. Daraus wird vom „WASKlim-EUS“ der Nutzwert einer Maßnahme aus Sicht der jeweiligen Wassernutzung errechnet.

Aus der Addition der Zustandsbewertung mit der Bewertung der Maßnahmen stellt letztendlich das „WASKlim-EUS“ dar, welche Maßnahmen für das Einzugsgebiet geeignet sein könnten. Auf diese Weise werden verschiedene Anpassungsmaßnahmen getrennt für jeden Wassernutzer bewertet.

Soll nun aus Sicht einer Behörde eine konkrete Maßnahme ermittelt werden, die für das Einzugsgebiet am geeignetsten erscheint, können die Wassernutzungen untereinander vom Entscheidungsträger gewichtet und eine Gesamteignung errechnet werden. Diese Gesamteignung wird anschließend vom „WASKlim-EUS“ für jede Anpassungsmaßnahme angegeben.

Expertenbefragung:

Da die Bewertungen des Wasserbedarfs und –dargebotes sowie der möglichen Anpassungsmaßnahmen nicht „vom Schreibtisch“ aus getroffen werden können, ist die Einbindung der Experten vor Ort erforderlich. Mit vorliegender Expertenbefragung werden o.g. Daten aus Sicht der jeweiligen Wassernutzung zusammengetragen. Diese werden, je nach Wassernutzung, variieren. Daher sind in einem letzten Schritt auch die Maßnahmen, die der jeweiligen Wassernutzung ggf. keine Vorteile erbringen, aber von anderen Stakeholdern vorgeschlagen wurden, zu bewerten. Dadurch können positive, aber auch negative Synergieeffekte der vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen aufgezeigt werden. Sind auch diese Größen erfasst, liegen alle Eingangsdaten für „WASKlim-EUS“ vor und das Entscheidungsunterstützungssystem kann für das Einzugsgebiet aufgestellt werden.

Im Einzugsgebiet der Oberen Iller soll nun das „WASKlim-EUS“ getestet werden. Hierzu sind wir auf Ihre Unterstützung als Wassernutzer angewiesen. Wir würden uns daher freuen, wenn Sie für „Ihre“ Wassernutzung folgende Expertenbefragung (13 Fragen) bearbeiten und uns bis **Mitte Juli 2009** zurückschicken würden an:

Universität der Bundeswehr München
z.H. Herr Heinisch
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Natürlich ist damit ein gewisser Aufwand verbunden (ca. 30-45min). Jedoch erwartet Sie im Anschluss daran ein aufgestelltes „WASKlim-EUS“ für Ihr Einzugsgebiet. Je mehr Stakeholder sich bereit erklären, desto größer ist der Nutzen für alle Beteiligten. Mit dem „WASKlim-EUS“ erhalten Sie ein System, das Ihnen aufzeigen kann, wie vulnerabel ihre Wassernutzung hinsichtlich des Klimawandels sein könnte, welche Schwellenwerte für Sie von besonderer Bedeutung sind und wie sich Anpassungsmaßnahmen für Sie, aber auch für andere Wassernutzungen auswirken können. Bei Fragen können Sie sich gerne auch direkt an Herrn Heinisch wenden. (Timo.Heinisch@unibw.de, Tel.: 089/6004-3860, Fax: 089/6004-4642).

Für die Mitwirkung an der Expertenbefragung bedanken wir uns im Vorfeld!

Übersicht Expertenbefragung:

Für das „WASKlim-EUS“ sind folgende Angaben für **jeweils eine gewählte Wassernutzung** erforderlich. Bitte füllen Sie den Fragebogen somit lediglich aus Sicht einer Wassernutzung aus.

Wassernutzungen allgemein:

- 1) Welche **Wassernutzungen** sind im untersuchten Einzugsgebiet vorhanden?

Wasserdargebot:

- 2) Welche hydrologischen Kenngrößen sind aus Ihrer Sicht für die Bewertung des **Wasserdargebotes** für Ihre Wassernutzung erforderlich?
- 3) Wie würden Sie die in Frage 2 gewählten hydrologischen Kenngrößen für das **Wasserdargebot** für Ihre Wassernutzung bewerten?
- 4) Wie würden Sie die in Frage 2 gewählten hydrologischen Kenngrößen für das **Wasserdargebot** für Ihre Wassernutzung gewichten?

Wasserbedarf:

- 5) Welche Entwicklungs-Kenngrößen sind aus Ihrer Sicht für die Bewertung des **Wasserbedarfs** für Ihre Wassernutzung erforderlich?
- 6) Wie würden Sie die in Frage 5 gewählten Entwicklungs-Kenngrößen für den **Wasserbedarf** für Ihre Wassernutzung bewerten?
- 7) Wie würden Sie die in Frage 5 gewählten Entwicklungs-Kenngrößen für den **Wasserbedarf** für Ihre Wassernutzung gewichten?

Anpassungsmaßnahmen:

- 8) Welche **Anpassungsmaßnahmen** sind Ihrer Meinung nach für Ihre Wassernutzung zu empfehlen? (Neue, d.h. noch nicht umgesetzte oder Ergänzungen zu bereits umgesetzten Maßnahmen)
- 9) Wie würden Sie Ihre vorgeschlagenen **Anpassungsmaßnahmen** aus Frage 8 für Ihre Wassernutzung bewerten?
- 10) Wie würden Sie die Bewertungskriterien der **Anpassungsmaßnahmen** für Ihre Wassernutzung gewichten?
- 11) Wie würden Sie die **Anpassungsmaßnahme** aus Frage 8 unter Berücksichtigung von weiteren Aspekten insbesondere der Kosten für Ihre Wassernutzung verbal argumentativ beurteilen?

Selbsteinschätzung und Kommentare:

- 12) Wie würden Sie Ihre fachliche Beurteilungsfähigkeit selbst einschätzen?
- 13) Kommentare und Anmerkungen

- 5 -

Angaben zur PersonName: Einrichtung: Wassernutzung: *(welche Wassernutzung vertreten Sie als Experte)***1. Welche Wassernutzungen sind im Einzugsgebiet der Oberen Iller vorhanden?***Bitte jeweils nur eine Antwort ankreuzen.*

Nr.	Wassernutzung	Ja	Nein	Keine Angabe	Bemerkungen
1.	Wasserkraftanlagen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
2.	Trinkwasserversorgung aus Grundwasser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
3.	Brauchwasserversorgung aus Grundwasser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
4.	Brauchwasserversorgung aus Oberflächenwasser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
5.	Abwassereinleitungen aus Kläranlagen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
6.	Fischerei	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
7.	Gewässerzustand aus biologischer Sicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
8.	Wintersport	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
9.	Hochwasserschutz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
10.	Freizeitnutzung der Fließgewässer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
11.	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
12.	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>

2. Welche hydrologischen Kenngrößen sind aus Ihrer Sicht für die Bewertung des Wasserdargebotes für Ihre Wassernutzung erforderlich?

Bitte wählen Sie max. 10 Kenngrößen aus unten stehender Tabelle aus.

Nr.	Mögliche hydrologische Kenngrößen	Ja	Nein	Bemerkungen:
1.	MHQ (J) = mittlerer Hochwasserabfluss (Jahr)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2.	MHQ (S) = MHQ hydrologisches Sommerhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3.	MHQ (W) = MHQ hydrologisches Winterhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4.	MQ (J) = Mittelwasserabfluss (Jahr)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5.	MQ (S) = MQ hydrologisches Sommerhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6.	MQ (W) = MQ hydrologisches Winterhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7.	MNQ (J) = Mittlerer Niedrigwasserabfluss (Jahr)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8.	MNQ (S) = MNQ hydrologisches Sommerhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9.	MNQ (W) = MNQ hydrologisches Winterhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10.	HHQ = höchster Hochwasserabfluss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11.	NNQ = niedrigster Niedrigwasserabfluss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12.	UZ ND < MNQ (J) = Anzahl der Unterschreitungstage von MNQ (J)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13.	UZ ND < MNQ (S) = Anzahl der Unterschreitungstage von MNQ (S)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14.	UZ ND < MNQ (W) = Anzahl der Unterschreitungstage von MNQ (W)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15.	GWN = Grundwasserneubildungsrate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16.	Wassertemperatur (S) = Wassertemperatur im hydrol. Sommerhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17.	Wassertemperatur (W) = Wassertemperatur im hydrol. Winterhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18.		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19.		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20.		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

- 8 -

4. Wie würden Sie die in Frage 2 gewählten hydrologischen Kenngrößen für das Wasserdargebot hinsichtlich der Bedeutung für Ihre Wassernutzung (prozentual) gewichten?

Sie müssen zwischen einer „einfachen Gewichtung“ (Möglichkeit A) und einer „anspruchsvollen Gewichtung“ (Möglichkeit B) wählen. Bitte nur eine Möglichkeit beantworten.

Möglichkeit A: „Einfache Gewichtung (frei gewählt)“

Nr.	Hydrologische Kenngrößen (s. Frage 2)	Gewichtung [%]
1.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
7.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
8.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
9.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
10.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Summe:	100 %

5. Welche Entwicklungs-Kenngrößen sind aus Ihrer Sicht für die Bewertung des zukünftigen Wasserbedarfs für Ihre Wassernutzung erforderlich?

Bitte wählen Sie max. 4 Entwicklungs-Kenngrößen aus unten stehender Tabelle aus.

Nr.	Mögliche Entwicklungs-Kenngrößen	Ja	Nein	Bemerkungen:
1.	Lufttemperatur (Sommer)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2.	Lufttemperatur (Winter)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3.	Bevölkerungsentwicklung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4.	Ökonomischer Strukturwandel (Energieversorgung, Land-/Forstwirtschaft, kultureller Umgang mit Wasser ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

6. Wie würden Sie die in Frage 5 gewählten Entwicklungs-Kenngrößen für Ihre Wassernutzung hinsichtlich eines möglichen Wasserbedarfs bewerten? Das heißt, wie müsste sich die jeweilige Entwicklungs-Kenngröße verändern (in Prozent), so dass sich der entsprechende Wasserbedarf einstellt?

Hinweise:

- Es gibt 7 Bewertungsstufen, von es wird „sehr viel mehr (= -3)“ Wasser als heute benötigt bis es wird „sehr viel weniger (= +3)“ Wasser als heute benötigt.
- 100% entspricht dem heutigen Bedarf
- Eine Änderung von „+ 10%“ ist als „110%“ einzugeben.
- Sie können einen konkreten Prozentwert (z.B. 125%) oder eine Bandbreite (z.B. 98% - 102%) eingeben.
- Bitte geben Sie nur die Prozentwerte an, die Sie eindeutig einer Zustandsstufe zuordnen können. Die Bereiche dazwischen werden vom Fuzzy-Logik-System automatisch als Unschärfe berücksichtigt.
- Die Bewertungsstufen „-3“ und „+3“ sind zwingend auszufüllen. Sollten Sie die restlichen Bewertungsstufen nicht bewerten, dann wird die Stufe „0“ mit 100% bewertet und die restlichen Stufen linear interpoliert.
- Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug im Sommer (Mai-Okt) im Zeitraum 1971-2000 ca. 12,6°C und im Winter (Nov-Apr) ca. 0,9°C (Kempten).

Beispiel:

Nr.	Entwicklungs-Kenngrößen	[-3;3]	-3 (sehr viel mehr)	-2 (viel mehr)	-1 (mehr)	0 (gleich viel)	+1 (weniger)	+2 (viel weniger)	+3 (sehr viel weniger)
1.	Lufttemperatur (S) (Ø Mai-Okt)	[%]	> 120	-	105	102 - 98	95		< 90

zu Frage 6:

Nr.	Entwicklungs-Kenngrößen	[-3;3]	-3 (sehr viel mehr)	-2 (viel mehr)	-1 (mehr)	0 (gleich viel)	+1 (weniger)	+2 (viel weniger)	+3 (sehr viel weniger)
1.	Lufttemperatur (Sommer) (Ø Mai-Okt)	[%]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	Lufttemperatur (Winter) (Ø Nov-Apr)	[%]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	Bevölkerungsentwicklung	[%]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	Ökonomischer Strukturwandel	<input type="checkbox"/>	Hier liegen keine Zukunftsszenarien vor, daher ist eine einfach Einschätzung vorzunehmen. Wie beurteilen Sie die zukünftige Entwicklung des ökonomischen Strukturwandels hinsichtlich des Wasserbedarfs. Bitte vergeben Sie hierzu eine Bewertungsstufe zwischen -3 und 3.						

- 11 -

7. Wie würden Sie die in Frage 5 gewählten Entwicklungs-Kenngrößen für den Wasserbedarf für Ihre Wassernutzung (prozentual) gewichten?

Sie müssen zwischen einer „einfachen Gewichtung“ (Möglichkeit A) und einer „anspruchsvollen Gewichtung“ (Möglichkeit B) wählen. Bitte nur eine Möglichkeit beantworten.

Möglichkeit A: „Einfache Gewichtung (frei gewählt)“

Nr.	Entwicklungs-Kenngrößen	Gewichtung [%]
1.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Summe:	100 %

Möglichkeit B: „Anspruchsvolle Gewichtung“ (mittels AHP-Methode)

Die „anspruchsvolle Gewichtung“ erfolgt mit Hilfe des „Analytischen-Hierarchie-Prozesses“. Dabei werden immer zwei Kennwerte miteinander verglichen und bewertet. Aus dieser paarweisen Bewertung ist es über die AHP-Methode möglich, Einzelgewichte zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt automatisch vom WASKlim-EUS.

Bewertungsstufen:

+3 = sehr viel wichtiger, +2 = viel wichtiger, +1 = wichtiger, 0 = gleichwichtig, -1 = unwichtiger, -2 = viel unwichtiger, -3 = sehr viel unwichtiger

Beispiel: siehe Frage 4 (Möglichkeit B)

zu Frage 7

Nr.	Entwicklungs-Kenngrößen	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
1.	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	<input type="text"/>	-	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	<input type="text"/>	-	-	0	<input type="text"/>
4.	<input type="text"/>	-	-	-	0

8. Welche Anpassungsmaßnahmen sind Ihrer Meinung nach für Ihre Wassernutzung zu empfehlen?

Bitte geben Sie nur neue, d.h. noch nicht umgesetzte oder Ergänzungen zu bereits umgesetzten Maßnahmen an.

Eine Auswahl an möglichen Anpassungsmaßnahmen finden Sie im Anhang.

Sollen Sie mehr als 4 Maßnahmen angeben wollen, können Sie dies gerne auf einem Beiblatt tun.

Nr.	Anpassungsmaßnahme	Bemerkungen
1.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	<input type="text"/>	<input type="text"/>

9. Wie würden Sie Ihre vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen aus Frage 8 für Ihre Wassernutzung bewerten?

Bitte verwenden Sie die angegebenen Bewertungskriterien aus unten stehender Liste.

Bewertungsstufen:

-3 = äußerst schlecht, -2 = sehr schlecht, -1 = schlecht, 0 = neutral, +1 = gut, +2 = sehr gut, +3 = äußerst gut

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 1)		<input type="text"/>	
Nr.	Bewertungskriterien	Bewertung [-3 bis +3]	Begründung
1.	Nutzen kurz-/mittelfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	Nutzen langfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	Beitrag zum Klimaschutz	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	Resilienz (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5.	Nutzungskonflikte / Machbarkeit (technisch/rechtlich/politisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

- 13 -

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 2)		<input type="text"/>	
Nr.	Bewertungskriterien	Bewertung [-3 bis +3]	Begründung
1.	Nutzen kurz-/mittelfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	Nutzen langfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	Beitrag zum Klimaschutz	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	Resilienz (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5.	Nutzungskonflikte / Machbarkeit (technisch/rechtlich/politisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 3)		<input type="text"/>	
Nr.	Bewertungskriterien	Bewertung [-3 bis +3]	Begründung
1.	Nutzen kurz-/mittelfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	Nutzen langfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	Beitrag zum Klimaschutz	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	Resilienz (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5.	Nutzungskonflikte / Machbarkeit (technisch/rechtlich/politisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 4)		<input type="text"/>	
Nr.	Bewertungskriterien	Bewertung [-3 bis +3]	Begründung
1.	Nutzen kurz-/mittelfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	Nutzen langfristig	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	Beitrag zum Klimaschutz	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	Resilienz (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5.	Nutzungskonflikte / Machbarkeit (technisch/rechtlich/politisch)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

10. Wie würden Sie die vorgegebenen Bewertungskriterien der Anpassungsmaßnahmen für Ihre Wassernutzung gewichten?

Sie müssen zwischen einer „einfachen Gewichtung“ (Möglichkeit A) und einer „anspruchsvollen Gewichtung“ (Möglichkeit B) wählen. Bitte nur eine Möglichkeit beantworten.

Möglichkeit A: „Einfache Gewichtung (frei gewählt)“

Nr.	Bewertungskriterien	Gewichtung [%]
1.	Nutzen kurz-/mittelfristig	<input type="text"/>
2.	Nutzen langfristig	<input type="text"/>
3.	Beitrag zum Klimaschutz	<input type="text"/>
4.	Resilienz (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)	<input type="text"/>
5.	Nutzungskonflikte / Machbarkeit (technisch/rechtlich/politisch)	<input type="text"/>
	Summe:	100 %

Möglichkeit B: „Anspruchsvolle Gewichtung“ (mittels AHP-Methode)

Die „anspruchsvolle Gewichtung“ erfolgt mit Hilfe des „Analytischen-Hierarchie-Prozesses“. Dabei werden immer zwei Kennwerte miteinander verglichen und bewertet. Aus dieser paarweisen Bewertung ist es über die AHP-Methode möglich, Einzelgewichte zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt automatisch vom WASKlim-EUS.

Bewertungsstufen:

+3 = sehr viel wichtiger, +2 = viel wichtiger, +1 = wichtiger, 0 = gleichwichtig, -1 = unwichtiger, -2 = viel unwichtiger, -3 = sehr viel unwichtiger

Beispiel: siehe Frage 4 (Möglichkeit B)

zu Frage 8

Nr.	Bewertungskriterien	N-k/m	N-l	BzK	Resi	N-K
1.	Nutzen kurz-/mittelfristig (N-k/m)	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2.	Nutzen langfristig (N-l)	-	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3.	Beitrag zum Klimaschutz (BzK)	-	-	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4.	Resilienz (Resi) (langfristig anpassbar, flexibel, elastisch)	-	-	-	0	<input type="text"/>
5.	Nutzungskonflikte / Machbarkeit (N-K) (technisch/rechtlich/politisch)	-	-	-	-	0

- 15 -

11. Wie würden Sie die Anpassungsmaßnahmen aus Frage 8 unter Berücksichtigung von weiteren Aspekten insbesondere der Kosten für Ihre Wassernutzung verbal argumentativ beurteilen?

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 1)	<input type="text"/>
Geschätzte Herstellkosten der Maßnahme (in Euro)	<input type="text"/>
Geschätzte laufende Kosten pro Jahr (in Euro)	<input type="text"/>
Vorteile: <input type="text"/>	Nachteile: <input type="text"/>

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 2)	<input type="text"/>
Geschätzte Herstellkosten der Maßnahme (in Euro)	<input type="text"/>
Geschätzte laufende Kosten pro Jahr (in Euro)	<input type="text"/>
Vorteile: <input type="text"/>	Nachteile: <input type="text"/>

Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 3)	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Geschätzte Herstellkosten der Maßnahme (in Euro)	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Geschätzte laufende Kosten pro Jahr (in Euro)	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Vorteile:	Nachteile:
<div style="border: 1px solid black; width: 95%; height: 95%; margin: 5px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 95%; height: 95%; margin: 5px;"></div>
Betrachtete Anpassungsmaßnahme (Nr. 4)	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Geschätzte Herstellkosten der Maßnahme (in Euro)	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Geschätzte laufende Kosten pro Jahr (in Euro)	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Vorteile:	Nachteile:
<div style="border: 1px solid black; width: 95%; height: 95%; margin: 5px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 95%; height: 95%; margin: 5px;"></div>

- 17 -

12. Wie würden Sie Ihre fachliche Beurteilungsfähigkeit selbst einschätzen?

Bitte je Frage nur eine Antwort ankreuzen.

Nr.	Fragen 1-11 in Kurzform	unsicher	ziemlich sicher	sicher
1.	Vorhandene Wassernutzungen im Einzugsgebiet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	Hydrologische Kenngrößen Wasserdargebot	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	Bewertung Wasserdargebot	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	Gewichtung hydrologische Kenngrößen Wasserdargebot	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.	Entwicklung-Kenngrößen Wasserbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.	Bewertung Wasserbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7.	Gewichtung Entwicklungs-Kenngrößen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8.	Anpassungsmaßnahmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9.	Bewertung Anpassungsmaßnahmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10.	Gewichtung Bewertungskriterien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.	Verbale Bewertung Anpassungsmaßnahmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

13. Kommentare und Anmerkungen zu dieser Expertenbefragung:

Anhang: Maßnahmenkatalog (vorläufige, unvollständige Liste potenzieller Anpassungsmaßnahmen)**Wasserversorgung:**

Trinkwasserversorgung

- Überprüfung der Wasserversorgungsinfrastruktur
- Überwachung der vorhandenen Leitungsnetze
- Verbesserung der Siedlungsentwässerung
- Einbindung von wenig strapazierten Grundwasservorkommen in das Fernleitungsnetz
- Fernwassernetz ausbauen
- Verbund von Anlagen
- Reserven in bestehenden Versorgungssystem ermitteln
- Wasserentnahmeregelungen überprüfen
- Wasserrechte anpassen (vorrangig öffentliche Trinkwasserversorgung)
- Niedrigwassermanagement verbessern
- Schutz von sensiblen oberirdischen Gewässern
- TW-Talsperren optimieren (Steuerung + Volumen)
- Ausweitung von Wasserschutzgebieten
- Schutz des Tiefengrundwasservorrats
- Schutz des nutzbaren Grundwasservorkommens
- Grundwassermonitoring
- Fortschreibung statistischer Niederschlagsanalysen
- Prognosen zur Veränderung der Rohwasserqualität erstellen
- energieeffiziente Wasserversorgung gemessen in kWh/m³ bevorzugen
- Notfallpläne erstellen (Niedrigwasserbereich)

Landwirtschaft

- verbesserte Bewässerungsmethoden
- angepasste Landnutzungen
- produktionsintegrierter Umweltschutz
- weniger bewässerungsbedürftige Pflanzen anbauen
- kein Trinkwasser aus Grundwasser für Bewässerung verwenden
- Bewässerung während verdunstungsarmer Tageszeit durchführen
- moderne Techniken wie Tröpfchenbewässerung verwenden
- Speicherung des Niederschlags durch Speicherseen herstellen
- angepasste Regeltechniken in Beregnungsplänen festhalten

Wärmeanlagen

- alternative Kühlsysteme wie Kühltürme oder Zellenkühlanlagen einbauen
- Energiemix verbessern
- Dezentralisierung ausbauen
- Fernwärmenetze ausbauen
- Fortschreibung von Wärmelastplänen
- Aufstellung von Niedrigwassermanagementplänen
- Überprüfung aller Wasserentnahmen für Kühlzwecke
- moderne Simulationsmethoden verwenden
- Prozesswärme (Dampfauskopplung) für z.B. Betriebe ausbauen

Wasserkraftanlagen:

Laufwasserkraftwerke

- Anlagen modernisieren (günstigerer Wirkungsgrad)
- zusätzliches Potenzial ausnutzen
- Vergleichmäßigung des Wasserdargebotes (größere Speicher im Oberlauf)
- einheitliche Bemessungsstandards (Jährlichkeit) über Landesgrenze hinaus

Speicherkraftwerke

- Speichervolumen anpassen
- Kapazitätsausgleich durch Verbundlösungen herstellen
- Flexibilisierung der Bewirtschaftung
- Vergrößerung des Einzugsgebietes durch Beileitungen
- Optimierung des Feststoffmanagement

Gewässerzustand:

Wassertemperatur

- Einleitungsgrenzwerte der Anlagenbetreiber hinsichtlich Temperatur, Menge und zeitlicher Verteilung anpassen
- Nah- oder Fernwärmenetz ausbauen
- Kraft-Wärme-Kopplung optimieren bzw. ausbauen
- Verwendung von Kühltürmen
- Ausbau des Vorhersagenetzes hinsichtlich Niedrigwasserereignisse
- Gewässertemperatur flächendeckend erheben und hinsichtlich Wärmeeinleitungen überprüfen

Abwasser

- Steuerung kommunaler Entwässerungsanlagen an Abflussverhältnisse im Vorfluter anpassen
- Modernisierung der Kläranlagen hinsichtlich der Ablaufwerte/Hygiene (z.B. Membranfiltration, Sorptionsverfahren (Pulveraktivkohle), oxidative Verfahren (Ozonosierung), Photochemische Verfahren, Stützung der Struktur des belebten Schlammes)
- Trennung von Schmutz- und Niederschlagswasser incl. örtlicher Versickerung ausbauen
- bestehende Leitungsnetz regelmäßig überprüfen und entsprechend instandhalten
- Ausbau der Leitungsinfrastruktur (Erhöhung des Anschlussgrades auf 100%)
- Ausbau des Regenwassermanagement durch angepasste Rückhaltemaßnahmen

Diffuse Stoffeinträge

- Drainagen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen überprüfen
- Erosionsschutz, Schutz der Uferrandstreifen, Düngemanagement

Mindestwasserabfluss

- Aufhöhung des Mindestwasserabflusses durch Speichernaßnahmen
- Ausgleich durch verbesserten Wasserrückhalt in der Fläche während Überschusszeiten (stabilisiert den Basisabfluss)
- Niedrigwasseraufhöhung in seenreichen Landschaften wie Mecklenburg-Vorpommern durch Wehreglements aufbessern
- Grundwasserneubildungsrate durch angepasste Flächenbewirtschaftung verbessern

Durchgängigkeit

- Herstellung der Durchgängigkeit verbessert Wandermöglichkeiten der aquatischen Fauna, was zu einem verbesserten Nährstoffabbau im Gewässer führt

A.4. WASKlim-EUS Eingabedaten und Ergebnisse

A.4.1. Bevölkerungsentwicklung

Das Statistische Bundesamt veröffentlichte im November 2006 die 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung bis zum Jahr 2050 (Statistisches Bundesamt 2006). Die darin enthaltenen 12 Szenarien unterscheiden sich in den unterschiedlichen Annahmen zur Geburtenhäufigkeit, zur Lebenserwartung und zum Saldo der Zuzüge nach und der Fortzüge aus Deutschland. Abbildung A 7 zeigt den Bevölkerungsverlauf bis zum Jahr 2050 graphisch. Alle dargestellten Varianten sagen eine deutliche Bevölkerungsabnahme bis zum Jahr 2050 voraus.

In Deutschland lebten Ende des Jahres 2005 rund 82,4 Millionen Menschen. Wird vorausgesetzt, dass sich die Geburtenhäufigkeit fast konstant verhält, die Lebenserwartung der Männer um 7,6 Jahre und der Frauen um 6,5 Jahre ansteigt und ein Wanderungssaldo von +100.000 Personen („mittlere“ Bevölkerung, Untergrenze) erreicht wird, sinkt die Bevölkerungszahl bis zum Jahr 2050 auf knapp 69 Millionen Menschen (Variante 1-W1). Das sind rund 14 Millionen Menschen weniger als im Jahr 2005, was etwas unter dem Niveau des Jahres 1950 liegt. Geht man von einem höheren Wanderungssaldo („mittlere“ Bevölkerung, Obergrenze), d.h. + 200.000 Menschen bis zum Jahr 2050 aus, wird der Bevölkerungsrückgang etwas langsamer sein. Unter Berücksichtigung dieser Annahme werden im Jahr 2050 rund 74 Millionen Menschen in Deutschland leben, d.h. ca. 8 Millionen weniger als im Jahr 2005 (Variante 1-W2). Die Szenarien zeigen einen deutlichen Bevölkerungsrückgang bis zum Jahr 2050 auf, sofern sich die aktuelle demografische Entwicklung nicht grundlegend ändert (Tabelle A 4) (Statistisches Bundesamt 2006, BBR 2009).

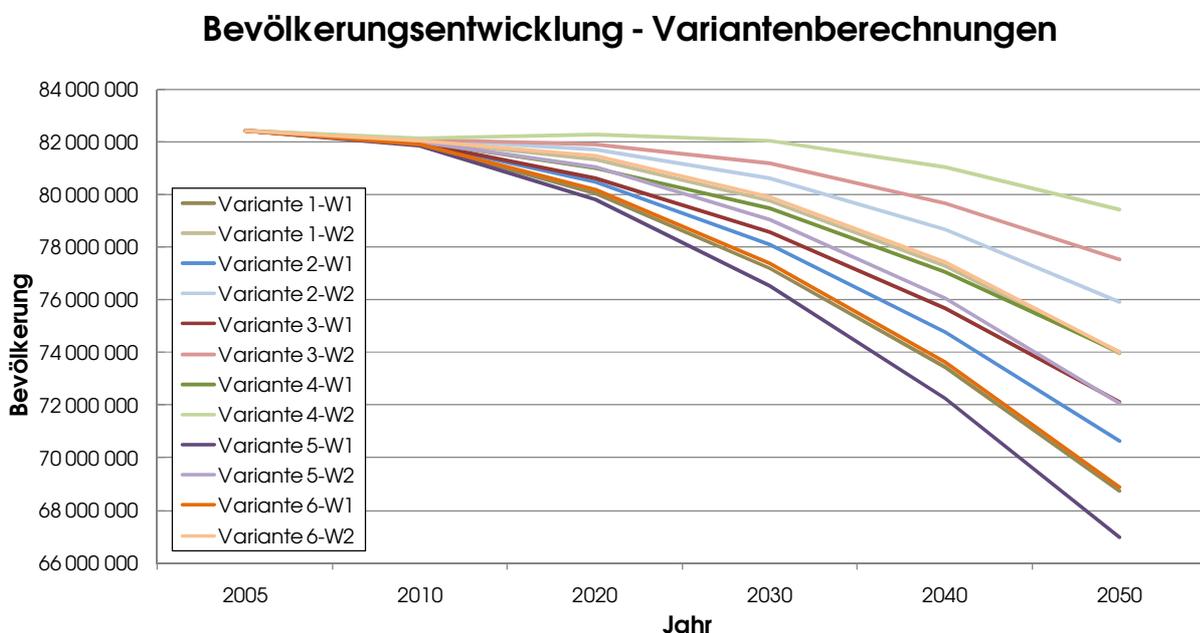


Abbildung A 7: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland – Varianten (Daten aus: STATISTISCHES BUNDESAMT 2006)

Tabelle A 4: Übersicht Bevölkerungsentwicklung in Deutschland

Bevölkerungsentwicklung						
Variante	2005	2010	2020	2030	2040	2050
V1-W1	82.438.000	81.887.000	80.057.000	77.203.000	73.422.000	68.743.000
Abweichung [%]	100	99,3	97,1	93,6	89,1	83,4
V1-W2	82.438.000	82.039.000	81.328.000	79.750.000	77.288.000	73.958.000
Abweichung [%]	100	99,5	98,7	96,7	93,8	89,7
V2-W1	82.438.000	81.930.000	80.464.000	78.080.000	74.799.000	70.653.000
Abweichung [%]	100	99,4	97,6	94,7	90,7	85,7
V2-W2	82.438.000	82.082.000	81.735.000	80.630.000	78.676.000	75.895.000
Abweichung [%]	100	99,6	99,1	97,8	95,4	92,1
V3-W1	82.438.000	81.943.000	80.612.000	78.589.000	75.675.000	72.104.000
Abweichung [%]	100	99,4	97,8	95,3	91,8	87,5
V3-W2	82.438.000	82.095.000	81.896.000	81.190.000	79.652.000	77.516.000
Abweichung [%]	100	99,6	99,3	98,5	96,6	94
V4-W1	82.438.000	81.986.000	81.019.000	79.467.000	77.054.000	74.015.000
Abweichung [%]	100	99,5	98,3	96,4	93,5	89,8
V4-W2	82.438.000	82.138.000	82.304.000	82.071.000	81.041.000	79.454.000
Abweichung [%]	100	99,6	99,8	99,6	98,3	96,4
V5-W1	82.438.000	81.865.000	79.803.000	76.514.000	72.255.000	66.975.000
Abweichung [%]	100	99,3	96,8	92,8	87,6	81,2
V5-W2	82.438.000	82.017.000	81.070.000	79.030.000	76.055.000	72.071.000
Abweichung [%]	100	99,5	98,3	95,9	92,3	87,4
V6-W1	82.438.000	81.908.000	80.210.000	77.391.000	73.633.000	68.884.000
Abweichung [%]	100	99,4	97,3	93,9	89,3	83,6
V6-W2	82.438.000	82.060.000	81.478.000	79.910.000	77.442.000	74.007.000
Abweichung [%]	100	99,5	98,8	96,9	93,9	89,8
Min						81,20
Max						96,40
Mittel						88,38

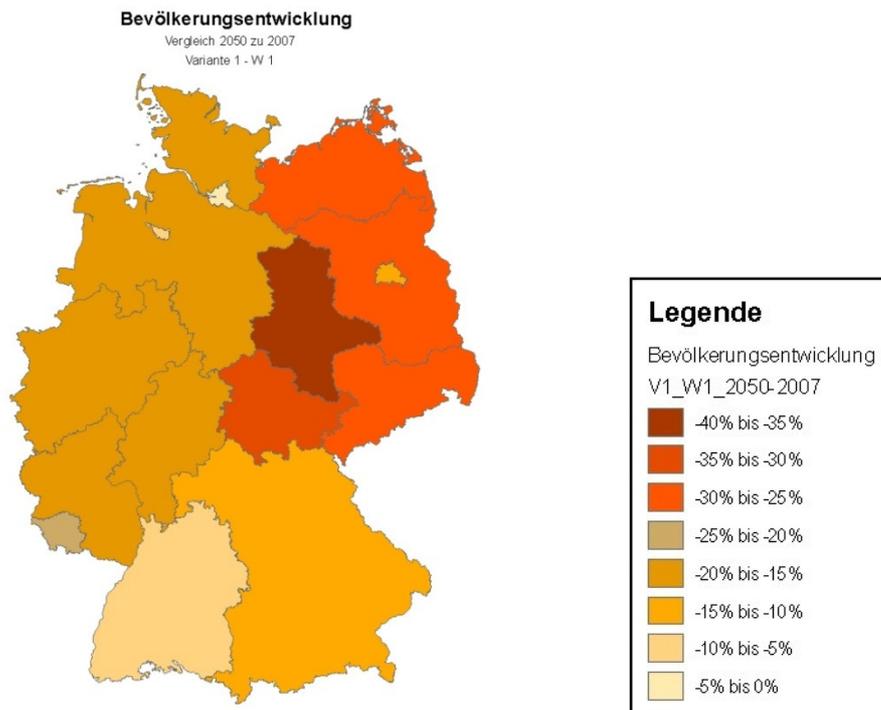


Abbildung A 8: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2050, Variante 1 - W1 (Daten aus: STATISTISCHES BUNDESAMT 2006)

Die Abbildung A 8 zeigt die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2050, getrennt nach Bundesländern am Beispiel der Variante 1 - W1 („mittlere“ Bevölkerung, Untergrenze). Die Bevölkerungsabnahme erfolgt, mit Ausnahme von Berlin, überwiegend in Ostdeutschland. Hier sind Rückgänge von bis zu 35 %, bezogen auf das Jahr 2007, zu erwarten. Im süddeutschen Raum ist die Abnahme mit rund 10 % dagegen relativ gering. Dieser Trend, also eine prozentual höhere Abnahme im Osten, lässt sich für andere Szenarien ebenfalls feststellen.

A.4.2. Testregion Wupper

Tabelle A 5: Übersicht Klimaszenarien Wupper 1/2

Wasserdargebot Wupper											
2021-2050	W_A1B_f	W_A1B_t	W_A2_f	W_A2_t	W_B1_f	W_B1_t	R_A1B	R_A2	R_B1	Min	Max
Gebietsauslass	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
MHQ (J)	96.2	89.4	101.4	100.2	102.5	102.2	100.3	81.5	110.2	81.5	110.2
(S)	98.2	85.8	106.6	84.7	94.7	90.7	98.9	74.3	125.1	74.3	125.1
(W)	98.3	92.4	103.0	104.5	103.6	106.1	101.7	78.9	108.7	78.9	108.7
MQ (J)	99.3	98.2	103.2	103.1	103.4	108.6	108.8	76.2	122.3	76.2	122.3
(S)	90.2	94.2	107.4	93.8	92.4	101.6	101.8	61.2	132.7	61.2	132.7
(W)	103.7	100.3	101.2	107.9	108.8	112.2	114.1	87.5	114.5	87.5	114.5
MNQ (J)	117.8	115.4	126.3	120.5	109.1	118.9	72.3	56.3	84.3	56.3	126.3
(S)	110.8	121.3	120.0	119.6	105.2	118.9	78.8	56.2	109.2	56.2	121.3
(W)	101.2	137.5	123.6	144.5	137.8	150.5	134.2	93.0	126.4	93.0	150.5
HHQ (J)	97.0	92.5	88.5	105.9	106.2	112.6	98.0	81.4	133.1	81.4	133.1
(S)	100.8	94.5	91.2	104.5	97.6	91.4	84.4	81.8	109.2	81.8	109.2
(W)	97.0	92.5	88.5	105.9	106.2	112.6	98.0	81.4	133.1	81.4	133.1
NNQ (J)	335.5	187.4	336.3	212.9	335.4	153.8	73.4	57.6	64.3	57.6	336.3
(S)	335.5	193.2	0.0	212.9	335.4	153.8	73.9	57.6	64.3	0.0	335.5
(W)	257.0	161.5	239.4	291.1	155.3	230.3	41.7	45.9	52.3	41.7	291.1
UZ < MNQ (J)	49.0	109.0	33.8	55.5	49.0	96.9	128.2	239.5	116.9	33.8	239.5
(S)	54.0	102.0	37.2	55.6	45.3	90.7	150.8	306.9	131.2	37.2	306.9
(W)	0.0	325.0	0.0	50.0	85.7	287.5	90.2	125.9	92.9	0.0	325.0
GWN (J)	111.4	85.5	120.9	88.0	115.5	90.2	105.5	90.2	114.2	85.5	120.9
(S)	101.1	77.5	116.4	79.3	108.7	82.6	98.4	76.4	116.8	76.4	116.8
(W)	117.6	90.6	123.7	93.4	119.7	94.9	111.7	102.4	112.0	90.6	123.7
L-Temp (J)	115.7	116.5	117.3	116.7	114.8	113.5	109.5	109.2	104.5	104.5	117.3
(S)	110.8	109.7	111.0	109.6	109.3	107.7	106.7	105.9	102.4	102.4	111.0
(W)	132.0	138.7	138.2	140.4	132.9	133.0	118.5	119.5	111.6	111.6	140.4
W-Temp (J)	115.7	116.5	117.3	116.7	114.8	113.5	109.5	109.2	104.5	104.5	117.3
(S)	110.8	109.7	111.0	109.6	109.3	107.7	106.7	105.9	102.4	102.4	111.0
(W)	132.0	138.7	138.2	140.4	132.9	133.0	118.5	119.5	111.6	111.6	140.4
2071-2100											
MHQ (J)	95.0	108.5	97.0	94.2	95.9	97.1	102.6	84.2	98.9	84.2	108.5
(S)	74.9	79.6	110.4	85.0	92.2	87.2	107.6	83.5	99.2	74.9	110.4
(W)	98.9	117.3	94.7	94.5	100.8	98.1	100.3	86.1	97.7	86.1	117.3
MQ (J)	98.2	108.3	102.2	102.2	103.3	103.0	97.7	78.0	102.7	78.0	108.3
(S)	83.2	80.0	95.1	79.9	89.7	87.4	77.0	57.0	91.4	57.0	95.1
(W)	105.5	122.8	105.7	113.6	110.0	111.0	113.3	93.9	111.3	93.9	122.8
MNQ (J)	121.5	114.8	120.7	123.6	115.0	113.7	56.8	47.7	74.5	47.7	123.6
(S)	118.6	113.4	112.8	120.5	110.7	112.0	56.3	48.6	77.8	48.6	120.5
(W)	119.4	155.2	128.8	155.4	128.8	153.3	168.4	94.5	161.0	94.5	168.4
HHQ (J)	98.6	94.3	116.6	106.0	87.7	118.6	162.2	107.3	115.7	87.7	162.2
(S)	71.9	97.0	148.1	101.4	98.2	128.8	193.1	88.3	137.8	71.9	193.1
(W)	98.6	94.3	94.7	106.0	87.7	110.8	108.4	107.3	103.5	87.7	110.8
NNQ (J)	370.2	239.9	276.9	256.9	324.2	194.1	68.1	53.9	74.9	53.9	370.2
(S)	370.2	239.9	276.9	256.9	324.2	194.1	68.1	53.9	74.9	53.9	370.2
(W)	320.4	240.1	179.6	324.1	182.4	207.4	47.0	43.5	56.0	43.5	324.1
UZ < MNQ (J)	24.5	49.6	51.0	21.5	35.1	84.0	298.3	401.0	202.7	21.5	401.0
(S)	27.0	49.2	50.4	22.2	35.0	76.2	423.8	522.8	269.3	22.2	522.8
(W)	0.0	62.5	57.1	0.0	35.7	325.0	86.6	195.5	90.2	0.0	325.0
GWN (J)	111.8	86.5	118.6	87.2	117.5	87.2	96.8	87.9	102.9	86.5	118.6
(S)	100.8	68.2	103.0	71.1	103.8	69.9	75.2	65.7	90.7	65.7	103.8
(W)	118.5	97.8	128.1	97.2	125.9	97.9	115.9	107.7	113.8	97.2	128.1
L-Temp	132.6	131.2	130.4	130.1	126.8	128.7	131.1	129.0	119.4	119.4	132.6
(S)	119.7	118.2	118.3	118.6	116.9	117.5	121.4	119.3	112.8	112.8	121.4
(W)	175.3	174.1	170.5	167.7	159.7	165.7	162.5	160.5	140.9	140.9	175.3
W-Temp (J)	132.6	131.2	130.4	130.1	126.8	128.7	131.1	129.0	119.4	119.4	132.6
(S)	119.7	118.2	118.3	118.6	116.9	117.5	121.4	119.3	112.8	112.8	121.4
(W)	175.3	174.1	170.5	167.7	159.7	165.7	162.5	160.5	140.9	140.9	175.3

Tabelle A 6: Übersicht Klimaszenarien Wupper 2/2

Wasserbedarf

2021-2050

Bev.Entw.	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4
L-Temp (J)	115.7	116.5	117.3	116.7	114.8	113.5	109.5	109.2	104.5	104.5	117.3
(S)	110.8	109.7	111.0	109.6	109.3	107.7	106.7	105.9	102.4	102.4	111.0
(W)	132.0	138.7	138.2	140.4	132.9	133.0	118.5	119.5	111.6	111.6	140.4

2071-2100

Bev.Entw.	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4
L-Temp (J)	132.6	131.2	130.4	130.1	126.8	128.7	131.1	129.0	119.4	119.4	132.6
(S)	119.7	118.2	118.3	118.6	116.9	117.5	121.4	119.3	112.8	112.8	121.4
(W)	175.3	174.1	170.5	167.7	159.7	165.7	162.5	160.5	140.9	140.9	175.3

Tabelle A 7: Bewertung Wasserdargebot Wupper 1/2

Zustandsbewertung - Wasserdargebot (ohne Maßnahmen)

Wasserdargebot Bewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen Änderung [%]	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-ein Änderung [%]	Wasserversorgung TWV aus TS Änderung [%]	Wasserversorgung BW aus TW Änderung [%]	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein Änderung [%]	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Klär Änderung [%]	Gewässerzustand Fischerei Änderung [%]	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS Änderung [%]
1971-2000 (heute)	100	100	100	100	100	100	100	100
MHQ (J)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
81.5 bis 110.2	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 96.2 95.0	3							
MHQ (S)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
74.3 bis 125.1	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 98.2 74.9	3							
MHQ (W)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
78.9 bis 117.3	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 98.3 98.9	3							
MQ (J)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
76.2 bis 122.3	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 99.3 98.2	3							
MQ (S)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
57.0 bis 132.7	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 90.2 83.2	3							
MQ (W)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
87.5 bis 122.8	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 103.7 105.5	3							
MNQ (J)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
47.7 bis 126.3	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 117.8 121.5	3							
MNQ (S)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
48.6 bis 121.3	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 110.8 118.6	3							
MNQ (W)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
93.0 bis 168.4	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 101.2 119.4	3							
RIHQ (J)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
81.4 bis 162.2	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 97.0 98.6	3							
NNQ (J)	-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
53.9 bis 370.2	-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
0	1							
1	2							
2	3							
Klimaszenario: 2021-50 / 2071-2100 335.5 370.2	3							

Tabelle A 8: Bewertung Wasserdargebot Wupper 2/2

UZ < MINQ (J)	-3	Bew. Bew.											
Bandbreite [%]	-2	Gew. Gew.											
21.5 bis 401.0	-1	Ges. Ges.											
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
49.0 24.5	2												
	3												
UZ < MINQ (S)	-3	50	Bew. Bew.	300	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.						
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.						
22.2 bis 522.8	-1	100	Ges. Ges.	100	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.						
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
54.0 27.0	2												
	3	150							0	1.38 2.19	0.20 0.20	0.28 0.44	
UZ < MINQ (W)	-3		Bew. Bew.	300	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.						
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.						
0.0 bis 325.0	-1		Ges. Ges.	100	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.						
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
0.0 0.0	2								0	3.00 3.00	0.10 0.10	0.30 0.30	
	3												
GWN (J)	-3		Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	60	Bew. Bew.	Bew. Bew.					
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.					
85.5 bis 120.9	-1		Ges. Ges.	100	Ges. Ges.	100	Ges. Ges.	Ges. Ges.					
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
111.4 111.8	2												
	3												
L-Temp (S)	-3		Bew. Bew.	130	Bew. Bew.	140	Bew. Bew.	Bew. Bew.					
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.					
102.4 bis 121.4	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	Ges. Ges.					
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
110.8 119.7	2												
	3												
L-Temp (W)	-3		Bew. Bew.	75	Bew. Bew.	122	Bew. Bew.	Bew. Bew.					
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.					
111.6 bis 175.3	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	Ges. Ges.					
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
132.0 175.3	2												
	3												
W-Temp (S)	-3		Bew. Bew.	105	Bew. Bew.	117	Bew. Bew.	Bew. Bew.					
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.					
102.4 bis 121.4	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	Ges. Ges.					
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
110.8 119.7	2												
	3												
W-Temp (W)	-3		Bew. Bew.	111	Bew. Bew.	117	Bew. Bew.	Bew. Bew.					
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	Gew. Gew.					
111.6 bis 175.3	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	Ges. Ges.					
Klimaszenario:	0												
2021-50 / 2071-2100	1												
132.0 175.3	2												
	3												
Kontrolle Gewichtung:			1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00

Wasserdargebot Auswertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-einleit	Wasserversorgung TWV aus TS	Wasserversorgung BW aus TW	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Kläranl	Gewässerzustand Fischerei	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS
Dargebot Heute:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dargebot 2021-2050:	+1.5	-1.6	-1.5	-1.4	-0.1	0.9	1.1	2.9
Dargebot 2071-2100:	-1.5	-1.8	-1.4	-0.2	1.1	1.7	-3.0	0.7

Ergebnisbandbreite: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)

Tabelle A 9: Bewertung Wasserbedarf und Zustandsbewertung Wupper

Zustandsbewertung - Wasserbedarf (ohne Maßnahmen)

Wasserbedarf Bewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-einleit	Wasserversorgung TWV aus TS	Wasserversorgung BW aus TW	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Kläranl	Gewässerzustand Fischerei	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS
heute	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bev. Entw.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
0.0 bis 0.0	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100								
88.4 88.4								
L-Temp (S)	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
102.4 bis 121.4	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100								
110.8 119.7								
L-Temp (W)	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
Bandbreite [%]	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
111.6 bis 175.3	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100								
132.0 175.3								
Okon.Sw. - Energieversorgung	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.	Bew. Bew.
...	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.	Gew. Gew.
Punktbewertung:	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.	Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100:								
Kontrolle Gewichtung:	0.00 0.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00

Bewertung: +3 (es wird weniger Wasser benötigt als heute vorhanden), +2, +1, 0 (zufriedenstellend), -1, -2, -3 (es wird mehr Wasser benötigt als heute vorhanden)

Wasserbedarf Auswertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-einleit	Wasserversorgung TWV aus TS	Wasserversorgung BW aus TW	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Kläranl	Gewässerzustand Fischerei	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS
Bedarf Heute:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bedarf 2021-2050:	0.0	-2.5	1.8	2.8	0.0	0.6	0.0	1.9
Bedarf 2071-2100:	0.0	-2.5	1.8	2.8	0.0	0.5	0.0	1.9

Ergebnisbandbreite: +3 (es wird weniger Wasser benötigt als heute vorhanden), +2, +1, 0 (zufriedenstellend), -1, -2, -3 (es wird mehr Wasser benötigt als heute vorhanden)

Zustandsbewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-einleit	Wasserversorgung TWV aus TS	Wasserversorgung BW aus TW	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Kläranl	Gewässerzustand Fischerei	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS
Zustand heute (ohne Maßnahmen)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	+1.5	-3.0	0.3	2.7	0.9	1.7	-2.9	2.3
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.5	-3.0	0.4	2.6	1.1	2.2	-3.0	2.6

Ergebnisbandbreite (ohne Maßnahmen): +3 (äußerst gut), -3 (äußerst schlecht)

Tabelle A 10: Maßnahmenbewertung Wupper

Maßnahmenbewertung													
Anpassungsmöglichkeit Bewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-eintr	Wasserversorgung TWV aus TS	Wasserversorgung BW aus TW	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Klär	Gewässerzustand Fischerei	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS					
1.00	Gewichtung: 0.03	Gewichtung: 0.05	Gewichtung: 0.34	Gewichtung: 0.10	Gewichtung: 0.22	Gewichtung: 0.06	Gewichtung: 0.14	Gewichtung: 0.07					
Maßnahme 1: WKA-Modernisierung Steuerung													
Nutzen kurz/mittelfristig	3.0	Gew. 0.20											
Nutzen langfristig	3.0	0.50											
Beitrag zum Klimaschutz	3.0	0.10											
Resilienz (langf. anpassbar)	3.0	0.15											
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)	3.0	0.05											
Bewertung:	0.06	3.0	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 2: WKA-Modernisierung neue Turbine													
Nutzen kurz/mittelfristig	3.0	Gew. 0.20											
Nutzen langfristig	3.0	0.50											
Beitrag zum Klimaschutz	0.0	0.10											
Resilienz (langf. anpassbar)	1.0	0.15											
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)	2.0	0.05											
Bewertung:	0.07	2.4	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 3: Fernwärmenetz ausbauen													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		1.0	0.15										
Beitrag zum Klimaschutz		2.0	0.15										
Resilienz (langf. anpassbar)		3.0	0.08										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		-2.0	0.12										
Bewertung:	0.02	0.0	0.00	0.5	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 4: Kühlturm bauen													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		3.0	0.15										
Beitrag zum Klimaschutz		3.0	0.15										
Resilienz (langf. anpassbar)		-1.0	0.08										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		0.0	0.12										
Bewertung:	-0.03	0.0	0.00	-0.7	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 5: Speichersee optimieren													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		3.0	0.40										
Beitrag zum Klimaschutz		1.0	0.30										
Resilienz (langf. anpassbar)		0.0	0.05										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		3.0	0.20										
Bewertung:	0.76	0.0	0.00	0.0	0.00	2.3	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 6: Gewässer Schutz (oberirdisch)													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		2.0	0.40										
Beitrag zum Klimaschutz		3.0	0.30										
Resilienz (langf. anpassbar)		1.0	0.05										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		3.0	0.20										
Bewertung:	1.85	0.0	0.00	0.0	0.00	2.3	1.00	0.0	0.00	3.0	1.00	0.0	0.00
Maßnahme 7: Trennung von Schutz- und Regenwasser													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		3.0	0.32										
Beitrag zum Klimaschutz		3.0	0.21										
Resilienz (langf. anpassbar)		0.0	0.11										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		3.0	0.25										
Bewertung:	0.10	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	1.6	1.00	0.0	0.00
Maßnahme 8: Flächen entlang der Gewässer freihalten													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		2.0	0.10										
Beitrag zum Klimaschutz		3.0	0.10										
Resilienz (langf. anpassbar)		0.0	0.10										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		3.0	0.50										
Bewertung:	0.13	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	2.0	1.00
Maßnahme 9: Trinkwasserbedarf realistisch abschätzen													
Nutzen kurz/mittelfristig		Gew.											
Nutzen langfristig		2.0	0.10										
Beitrag zum Klimaschutz		3.0	0.10										
Resilienz (langf. anpassbar)		0.0	0.10										
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		3.0	0.50										
Bewertung:	0.14	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	2.1	1.00

Bewertung: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)

Tabelle A 11: Übersicht Zustandsbewertung Wupper

Übersicht Zustandsbewertung								
Zustandsbewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Energieerzeuger Kühlwassernahme/-eintr	Wasserversorgung TWV aus TS	Wasserversorgung BW aus TW	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	Gewässerzustand Abw. Einleitung aus Klär	Gewässerzustand Fischerei	Talsperren Konkurrenz HWS vs. TWV aus TS
W-A1B (fe)								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-1.5	-3.0	0.3	2.7	0.9	1.7	-2.9	2.3
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.5	-3.0	0.4	2.6	1.1	2.2	-3.0	2.6
W-A1B (tr)								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-0.5	-3.0	0.6	2.6	0.1	1.0	-2.7	3.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.2	-3.0	-0.1	3.0	0.6	1.4	-3.0	2.2
W-A2 (fe)								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.7	-3.0	0.1	3.0	1.3	2.4	-2.9	2.5
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-0.8	-3.0	0.3	3.0	1.3	1.9	-3.0	0.6
W-A2 (tr)								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-0.8	-3.0	0.2	3.0	0.6	1.7	-2.7	1.7
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.3	-3.0	0.4	3.0	0.7	2.0	-3.0	2.1
W-B1 (fe)								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-1.2	-3.0	0.1	3.0	1.0	1.7	-2.7	1.4
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.4	-3.0	0.4	3.0	1.2	2.0	-3.0	3.0
W-B1 (tr)								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.5	-3.0	0.1	3.0	0.5	1.2	-2.5	1.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.2	-3.0	0.3	3.0	0.5	0.8	-3.0	0.9
R-A1B								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.8	-3.0	0.4	3.0	0.0	0.3	-2.3	2.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.1	-3.0	0.0	2.6	-0.2	-1.0	-3.0	0.1
R-A2								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-1.7	-3.0	0.9	1.7	-1.1	-1.3	-2.2	3.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.7	-3.0	0.6	1.7	-0.9	-1.7	-3.0	2.5
R-B1								
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	2.1	-2.2	1.1	3.0	0.5	1.4	-1.8	-0.6
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-0.6	-3.0	0.2	3.0	0.1	-0.2	-3.0	0.8
9 Szenarien (Mittelwert)								
Mittelwert - Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-0.2	-2.9	0.4	2.8	0.4	1.1	-2.5	1.8
Mittelwert - Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-1.2	-3.0	0.3	2.8	0.5	0.8	-3.0	1.6

Tabelle A 12: Kriteriengewichtung Wupper

Gewichtung Wasserbedarf - Indikatoren

Abw. Einleitung aus Kläranl.		Evaluationsergebnis (Eva)								Zeilen- / Norm.				Bewertung
Inkonsistenzfaktor = 0.00 < 0.1										summe	Eig.-Vek.	(Eva*Wi)	(Ri/Wi)	
Bewertungskriterien	Gew.	L-Temp(S)	Bev. Entw.	Okon.Sw.						Ri	Wi	Ri'	Xi	
Lufttemperatur (S)	9.1%	1.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.273	0.091	0.273	3.000	
Bevölkerungsentwicklung	45.5%	5.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.364	0.455	1.364	3.000	
Ökonomischer Strukturwanc	45.5%	5.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.364	0.455	1.364	3.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
Anzahl = 3	100.0%	11.00	2.20	2.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00		9.00	

Xi_max = 3.00
 Ci = 0.00
 CR = 0.00
Konsistent!

Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

Gewichtung Anpassungsmaßnahmen - Kriterien

Abw. Einleitung aus Kläranl.		Evaluationsergebnis (Eva)								Zeilen- / Norm.				Bewertung
Inkonsistenzfaktor = 0.18 < 0.1										summe	Eig.-Vek.	(Eva*Wi)	(Ri/Wi)	
Bewertungskriterien	Gew.	Nutzen (K/M)	Nutzen (L)	Klimaschutz	Resilienz	N. Konflikte				Ri	Wi	Ri'	Xi	
Nutzen kurz/mittelfristig	32.2%	1.00	3.00	5.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.581	0.316	1.872	5.918	
Nutzen langfristig	21.1%	0.33	1.00	3.00	1.00	3.00	0.00	0.00	0.00	1.060	0.212	1.233	5.821	
Beitrag zum Klimaschutz	11.2%	0.20	0.33	1.00	0.33	3.00	0.00	0.00	0.00	0.560	0.112	0.660	5.887	
Resilienz	24.8%	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00	0.00	0.00	0.00	1.248	0.250	1.444	5.786	
Nutzungskonflikte	10.7%	1.00	0.33	0.33	0.33	1.00	0.00	0.00	0.00	0.551	0.110	0.618	5.608	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	
Anzahl = 5	100.0%	3.53	5.67	12.33	3.67	11.00	1.00	1.00	1.00	5.00	1.00		29.02	

Xi_max = 5.80
 Ci = 0.20
 CR = 0.18
grenzwertig!

Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

Gewichtung Wassernutzungen

Gewichtung		Evaluationsergebnis (Eva)								Zeilen- / Norm.				Bewertung
Inkonsistenzfaktor = 0.08 < 0.1										summe	Eig.-Vek.	(Eva*Wi)	(Ri/Wi)	
Bewertungskriterien	Gew.	WKA	KW	TW aus TS	BW aus TS	Gew. Z.	Abw. Einl.	Fisch-OL	HWS-TW	Ri	Wi	Ri'	Xi	
Wasserkraftanlagen	2.8%	1.00	0.33	0.11	0.33	0.20	0.33	0.33	0.33	0.227	0.028	0.250	8.825	
Kühlwassernahme-einleitu	4.7%	3.00	1.00	0.33	0.33	0.20	0.33	0.33	0.33	0.407	0.051	0.414	8.144	
TW aus TS	33.8%	9.00	3.00	1.00	5.00	3.00	5.00	3.00	5.00	2.634	0.329	2.968	8.075	
BW aus TW	10.2%	3.00	3.00	0.20	1.00	0.33	3.00	0.33	3.00	0.828	0.104	0.929	8.976	
Gewässerzust. allgemein	22.0%	5.00	5.00	0.33	3.00	1.00	5.00	3.00	3.00	1.722	0.215	1.982	9.209	
Abw. Einleitung aus Kläranl.	6.2%	3.00	3.00	0.20	0.33	0.20	1.00	0.33	1.00	0.527	0.066	0.562	8.527	
Fischerei	14.1%	3.00	3.00	0.33	3.00	0.33	3.00	1.00	3.00	1.104	0.138	1.272	9.216	
Nutzungskonkurrenz Talsper	6.5%	3.00	3.00	0.20	0.33	0.33	1.00	0.33	1.00	0.551	0.069	0.591	8.575	
Anzahl = 8	100.0%	30.00	21.33	2.71	13.33	5.60	18.67	8.67	16.67	8.00	1.00		70.55	

Xi_max = 8.82
 Ci = 0.12
 CR = 0.08
Konsistent!

Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

A.4.3. Testregion Salza / Weida

Tabelle A 13: Übersicht Klimaszenarien Salza

Wasserdargebot Salza

2021-2050	W_A1B_f	W_A1B_t	W_A2_f	W_A2_t	W_B1_f	W_B1_t	R_A1B	R_A2	R_B1	Min	Max
Zappendorf	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
MHQ (J)	102.13	90.07	74.24	68.76	105.22	151.20	112.57	71.66	133.43	68.8	151.2
(S)	104.96	75.24	91.13	69.65	114.44	127.28	131.37	79.46	191.21	69.7	191.2
(W)	98.15	86.08	69.57	65.67	99.57	132.35	95.43	71.58	108.94	65.7	132.4
MQ (J)	88.87	64.85	83.35	65.48	95.46	107.05	123.63	73.87	160.86	64.8	160.9
(S)	90.90	64.12	88.68	65.67	99.97	113.11	130.31	70.28	175.10	64.1	175.1
(W)	87.09	65.56	78.69	65.30	91.51	101.30	117.32	77.29	147.35	65.3	147.3
MNQ (J)	87.34	65.44	87.84	69.93	96.45	104.09	120.18	67.75	156.84	65.4	156.8
(S)	89.62	64.53	88.56	68.54	99.84	105.11	120.14	68.69	160.20	64.5	160.2
(W)	81.97	61.61	83.61	65.67	89.28	104.19	122.45	66.48	163.08	61.6	163.1
HHQ (J)	126.92	169.21	106.48	86.16	147.57	178.34	144.36	127.25	120.43	86.2	178.3
(S)	105.02	71.74	81.74	57.57	165.66	174.91	180.87	119.12	196.54	57.6	196.5
(W)	126.92	169.21	106.48	86.16	147.57	178.34	144.36	127.25	114.31	86.2	178.3
NNQ (J)	89.76	57.63	89.93	72.38	99.78	89.47	90.85	42.02	132.00	42.0	132.0
(S)	89.76	57.63	89.93	72.38	99.78	89.47	102.47	42.02	146.45	42.0	146.5
(W)	97.42	61.02	100.23	73.22	104.32	83.49	81.30	42.92	118.12	42.9	118.1
UZ < MNQ (J)	188.42	191.86	165.25	189.86	161.67	116.95	191.86	189.86	116.95	117.0	191.9
(S)	205.91	166.20	176.11	168.63	165.76	103.92	166.20	168.63	103.92	103.9	205.9
(W)	149.17	241.22	140.88	230.67	152.49	142.02	241.22	230.67	142.02	140.9	241.2
GWN (J)	95.83	58.79	90.52	57.08	98.82	113.47	133.13	71.79	172.86	57.1	172.9
(S)	132.74	29.00	-12.25	176.10	46.02	-143.03	125.33	-27.53	139.75	-143.0	176.1
(W)	99.33	55.89	80.77	68.66	93.81	88.53	141.04	172.58	206.47	55.9	206.5
L-Temp (J)	107.78	106.96	109.86	110.93	105.50	106.51	110.84	110.19	105.40	105.4	110.9
(S)	103.41	104.76	105.17	105.75	102.24	103.00	106.23	105.17	102.26	102.2	106.2
(W)	127.69	117.10	131.22	134.74	120.33	122.66	129.38	130.39	117.99	117.1	134.7
2071-2100											
MHQ (J)	76.88	84.59	77.46	87.60	86.43	62.90	150.16	67.31	132.37	62.9	150.2
(S)	102.15	99.58	101.05	92.69	99.48	72.95	236.86	96.00	188.03	72.9	236.9
(W)	64.79	67.51	69.55	77.68	86.76	56.88	91.64	59.33	99.57	56.9	99.6
MQ (J)	81.52	85.39	82.82	74.59	97.77	64.93	139.57	66.90	144.73	64.9	144.7
(S)	85.77	83.76	87.43	74.44	99.89	68.23	161.44	67.18	151.79	67.2	161.4
(W)	77.78	86.95	78.79	74.74	95.92	61.78	118.83	66.63	138.03	61.8	138.0
MNQ (J)	75.81	79.93	77.96	68.37	95.17	67.02	132.28	55.34	137.87	55.3	137.9
(S)	82.73	81.30	82.60	70.55	96.00	67.00	135.28	56.70	138.93	56.7	138.9
(W)	66.64	77.11	72.65	67.11	91.29	62.57	127.37	58.45	140.50	58.5	140.5
HHQ (J)	102.01	78.12	130.99	151.80	122.87	73.95	223.75	106.23	200.73	74.0	223.7
(S)	118.57	90.20	152.25	70.54	85.84	85.39	365.14	173.36	327.57	70.5	365.1
(W)	94.99	55.23	126.18	151.80	122.87	52.87	129.60	89.72	141.87	52.9	151.8
NNQ (J)	70.06	81.30	72.64	50.06	98.10	51.54	141.77	43.49	99.97	43.5	141.8
(S)	70.06	81.66	72.64	50.06	98.10	51.54	141.77	43.49	99.97	43.5	141.8
(W)	82.44	75.05	77.14	48.75	98.73	52.68	130.26	40.51	98.68	40.5	130.3
UZ < MNQ (J)	412.44	137.09	434.07	176.38	137.14	179.36	137.09	176.38	179.36	137.1	434.1
(S)	383.50	131.71	422.41	159.84	142.12	153.03	131.71	159.84	153.03	131.7	422.4
(W)	477.35	147.44	460.22	208.20	125.97	230.01	147.44	208.20	230.01	126.0	477.3
GWN (J)	87.36	82.15	90.59	66.98	104.98	64.14	133.13	71.79	172.86	64.1	172.9
(S)	219.91	383.82	290.96	125.28	142.11	-61.77	125.33	-27.53	139.75	-61.8	383.8
(W)	99.93	111.48	109.60	72.65	108.50	51.89	141.04	172.58	206.47	51.9	206.5
L-Temp (J)	122.63	126.49	122.97	123.06	118.88	121.84	132.27	131.86	121.27	118.9	132.3
(S)	109.79	114.45	111.38	111.94	109.78	111.25	118.92	118.51	112.06	109.8	118.9
(W)	181.32	181.94	175.91	174.27	160.45	170.56	186.03	185.63	158.36	158.4	186.0
Wasserbedarf											
2021-2050											
Bev.Entw.	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.4	88.4
L-Temp (J)	107.78	106.96	109.86	110.93	105.50	106.51	110.84	110.19	105.40	105.4	110.9
(S)	103.41	104.76	105.17	105.75	102.24	103.00	106.23	105.17	102.26	102.2	106.2
(W)	127.69	117.10	131.22	134.74	120.33	122.66	129.38	130.39	117.99	117.1	134.7
2071-2100											
Bev.Entw.	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.38	88.4	88.4
L-Temp (J)	122.63	126.49	122.97	123.06	118.88	121.84	132.27	131.86	121.27	118.9	132.3
(S)	109.79	114.45	111.38	111.94	109.78	111.25	118.92	118.51	112.06	109.8	118.9
(W)	181.32	181.94	175.91	174.27	160.45	170.56	186.03	185.63	158.36	158.4	186.0

Tabelle A 14: Bewertung Wasserdargebot Salza / Weida

Zustandsbewertung - Wasserdargebot (ohne Maßnahmen)

Wasserdargebot Bewertung	Wasserversorgung TW aus GW			Wasserversorgung BW aus GW			Wasserversorgung BW aus OW			Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Kläranlage		Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsystem		Gewässerzustand allgemein	
	Anderung [%]			Anderung [%]			Anderung [%]			Anderung [%]		Anderung [%]		Anderung [%]	
1971-2000 (heute)	100	0.00		100	0.00		100	0.00		100	0.00	100	0.00	100	0.00
MHQ (J)	-3	80	Bew. Bew.	80	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	130	Bew. Bew.	80	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		0.32 -3.00		0.32 -3.00										
62.9 bis 151.2	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.
Klimaszenario:	0	100	0.10 0.10	100	0.10 0.10					100	0.25 0.25				Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100: 102.1 76.9	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.						Ges. Ges.				Ges. Ges.
	2		0.03 -0.30		0.03 -0.30						-0.05 0.58				
	3	120		120						70					
MQ (J)	-3	80	Bew. Bew.	80	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	130	Bew. Bew.	80	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		-1.67 -2.77		-1.67 -2.77										
64.8 bis 160.9	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.
Klimaszenario:	0	100	0.40 0.40	100	0.40 0.40	100	0.30 0.30	100	0.20 0.20	100	0.20 0.20	100	0.05 0.05		
2021-50 / 2071-2100: 88.9 81.5	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.
	2		-0.67 -1.11		-0.67 -1.11		-0.33 -0.55		-0.22 -0.37		-0.22 -0.37		-0.09 -0.15		
	3	120		120		130		130				120			
MNQ (J)	-3	70	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		-1.27 -2.42		-1.27 -2.42										
55.3 bis 156.8	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.
Klimaszenario:	0	100	0.10 0.10	100	0.10 0.10	100	0.70 0.70	100	0.80 0.80		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100: 87.3 75.8	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.
	2		-0.13 -0.24		-0.13 -0.24		-0.89 -1.69		-1.01 -1.94						
	3	120		120		130		130							
MNQ (S)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	70	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	90	Gew. Gew.		
56.7 bis 160.2	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	95	Ges. Ges.		
Klimaszenario:	0											110	Ges. Ges.		
2021-50 / 2071-2100: 89.6 82.7	1												Ges. Ges.		
	2												-0.29 -0.49		
	3											130			
MNQ (W)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	70	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	95	Gew. Gew.		
58.5 bis 163.1	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	105	Ges. Ges.		
Klimaszenario:	0												Ges. Ges.		
2021-50 / 2071-2100: 82.0 66.6	1												-0.11 -0.22		
	2														
	3											130			
HHQ (J)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	130	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		
74.0 bis 223.7	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	100	Ges. Ges.		
Klimaszenario:	0												Ges. Ges.		
2021-50 / 2071-2100: 126.9 102.0	1												-2.69 -0.20		
	2												0.75 0.75		
	3											70	-2.02 -0.15		
UZ < MNQ (S)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	130	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		
103.9 bis 422.4	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	100	Ges. Ges.		
Klimaszenario:	0												Ges. Ges.		
2021-50 / 2071-2100: 205.9 383.5	1												0.35 0.35		
	2												-1.05 -1.05		
	3											70			
UZ < MNQ (W)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	130	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		
126.0 bis 477.3	-1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	100	Ges. Ges.		
Klimaszenario:	0												Ges. Ges.		
2021-50 / 2071-2100: 149.2 477.3	1												0.15 0.15		
	2												-0.45 -0.45		
	3											70			
GN (J)	-3	70	Bew. Bew.	70	Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	80	Bew. Bew.		
Bandbreite [%]	-2		-0.42 -1.26		-0.42 -1.26								Gew. Gew.		
57.1 bis 172.9	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		
Klimaszenario:	0	100	0.40 0.40	100	0.40 0.40		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	100	Ges. Ges.		
2021-50 / 2071-2100: 95.8 87.4	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.								Ges. Ges.		
	2		-0.17 -0.51		-0.17 -0.51								-0.06 -0.18		
	3	120		120								120			
Kontrolle Gewichtung:			1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00

Bewertung: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)

Wasserdargebot Auswertung	Wasserversorgung TW aus GW	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung BW aus OW	Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Kläranlage	Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsystem	Gewässerzustand allgemein
Dargebot Heute:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dargebot 2021-2050:	-0.9	-0.9	-1.2	-1.2	-2.1	-2.0
Dargebot 2071-2100:	-2.2	-2.2	-2.2	-2.3	0.4	-2.5

Ergebnisbandbreite: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)

Tabelle A 15: Bewertung Wasserbedarf und Zustandsbewertung Salza / Weida

Zustandsbewertung - Wasserbedarf (ohne Maßnahmen)													
Wasserbedarf Bewertung		Wasserversorgung TW aus GW Änderung [%]		Wasserversorgung BW aus GW Änderung [%]		Wasserversorgung BW aus OW Änderung [%]		Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Klär Änderung [%]		Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsys. Änderung [%]		Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein Änderung [%]	
heute		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Bev.Entw.		-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	
Bandbreite [%]		-2	1.74 1.74	Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	
0.0 bis 0.0		-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	
		0	0.60 0.60	Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	
2021-50 / 2071-2100: 88.4 88.4		1	1.05 1.05	Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	
		2											
		3											
L-Temp (S)		-3	Bew. Bew.	Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	
Bandbreite [%]		-2	Gew. Gew.	Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	
102.2 bis 118.9		-1	Ges. Ges.	Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	
		0											
		1											
		2											
		3											
2021-50 / 2071-2100: 103.4 109.8													
Okon.Sw.			Bew. Bew.	Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	
- Energieversorgung			-2.00 -2.00	-2.00 -2.00		-2.00 -2.00		-1.00 -1.00		0.00		0.00	
- ...			Gew. Gew.	Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	
			0.40 0.40	1.00 1.00		1.00 1.00		0.40 0.40		0.40 0.40		0.00	
			Ges. Ges.	Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	
Punktbewertung:			-0.80 -0.80	-2.00 -2.00		-2.00 -2.00		-0.40 -0.40					
2021-50 / 2071-2100:													
Kontrolle Gewichtung:			1.00 1.00	1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		0.00 0.00		1.00 1.00	
Bewertung: +3 (es wird weniger Wasser benötigt als heute vorhanden), +2, +1, 0 (zufriedenstellend), -1, -2, -3 (es wird mehr Wasser benötigt)													
Wasserbedarf Auswertung		Wasserversorgung TW aus GW		Wasserversorgung BW aus GW		Wasserversorgung BW aus OW		Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Klär		Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsys.		Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	
Bedarf Heute:		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
Bedarf 2021-2050:		0.2		-2.0		-2.0		0.6		0.0		-0.2	
Bedarf 2071-2100:		0.2		-2.0		-2.0		0.6		0.0		-1.3	
Ergebnisbandbreite: +3 (es wird weniger Wasser benötigt als heute vorhanden), +2, +1, 0 (zufriedenstellend), -1, -2, -3 (es wird mehr Wasser benötigt)													
Zustandsbewertung		Wasserversorgung TW aus GW		Wasserversorgung BW aus GW		Wasserversorgung BW aus OW		Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Klär		Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsys.		Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	
Zustand heute (ohne Maßnahmen)		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)		-0.7		-2.9		-3.0		-0.6		-2.1		-2.2	
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)		-2.0		-3.0		-3.0		-1.7		0.4		-3.0	
Ergebnisbandbreite ohne Maßnahme: +3 (äußerst gut), -3 (äußerst schlecht)													

Tabelle A 16: Maßnahmenbewertung Salza / Weida

Maßnahmenbewertung													
Anpassungsmöglichkeit Bewertung		Wasserversorgung TW aus GW		Wasserversorgung BW aus GW		Wasserversorgung BW aus OW		Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Klär		Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsys.		Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein	
1.00		Gewichtung: 0.44		Gewichtung: 0.06		Gewichtung: 0.03		Gewichtung: 0.06		Gewichtung: 0.06		Gewichtung: 0.34	
Maßnahme 1:		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.	
Fernwasserversorgung ausbauen		2.0		2.0		2.0		2.0		2.0		2.0	
Nutzen kurz/mittelfristig		0.08		0.30		0.30		0.30		0.30		0.30	
Nutzen langfristig		0.70		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
Beitrag zum Klimaschutz		0.08		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07	
Resilienz (langf.anpassbar)		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0	
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		0.08		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07	
Bewertung:		0.75		1.7		1.00		1.6		1.00		0.00	
Maßnahme 2:		z.B. durch Speicher im Oberlauf		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.	
Fixierung des Restwasserabflusses		2.0		2.0		2.0		2.0		2.0		2.0	
Nutzen kurz/mittelfristig		0.30		0.30		0.30		0.30		0.30		0.30	
Nutzen langfristig		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
Beitrag zum Klimaschutz		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07	
Resilienz (langf.anpassbar)		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0	
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07	
Bewertung:		0.25		1.6		1.00		1.6		1.00		0.00	
Maßnahme 3:		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.		Gew.	
Gewässerausbau		1.0		1.0		1.0		1.0		1.0		1.0	
Nutzen kurz/mittelfristig		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
Nutzen langfristig		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
Beitrag zum Klimaschutz		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07	
Resilienz (langf.anpassbar)		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0		-1.0	
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07	
Bewertung:		0.06		0.00		0.00		0.00		1.00		0.00	
Bewertung: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)													

Tabelle A 17: Übersicht Zustandsbewertung Salza / Weida

Übersicht Zustandsbewertung

Zustandsbewertung	Wasserversorgung TW aus GW	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung BW aus OW	Gewässerzustand Abw.Einleitung aus Kläranl.	Gewässerzustand Abw.Einl. aus Trennsys.	Gewässerzustand Gewässerzust. allgemein
W-A1B (fe)						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-1.7	-2.9	-3.0	-1.6	-2.1	-2.2
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-2.7	0.4	-3.0
W-A1B (tr)						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-2.0	-3.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.8	-3.0	-3.0	-2.3	2.0	-3.0
W-A2 (fe)						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-2.6	-3.0	-3.0	-1.7	0.2	-2.7
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.7	-3.0	-3.0	-2.5	-1.7	-3.0
W-A2 (tr)						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	1.8	-3.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-1.9	-3.0
W-B1 (fe)						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-1.1	-2.3	-2.4	-0.8	-2.4	-1.6
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-0.9	-2.1	-2.4	-0.8	-1.4	-2.7
W-B1 (tr)						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.8	-0.4	-1.5	0.1	-3.0	-0.5
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	2.6	-3.0
R-A1B						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	2.1	0.9	0.1	1.7	-2.6	-1.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	2.2	1.0	1.0	2.6	-3.0	-2.8
R-A2						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-1.3	-3.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	0.3	-3.0
R-B1						
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	2.2	1.0	1.0	2.6	-2.3	0.9
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	2.2	1.0	1.0	2.6	-3.0	-1.7
9 Szenarien (Mittelwert)						
Mittelwert - Zustand 2021-2050 (ohne Maßn)	-1.0	-1.7	-2.0	-1.0	-1.5	-1.8
Mittelwert - Zustand 2071-2100 (ohne Maßn)	-1.6	-2.0	-2.0	-1.3	-0.6	-2.8

Tabelle A 18: Kriteriengewichtung Salza / Weida

Gewichtung Wasserdargebot

Gewässerzust. allgemein

Inkonsistenzfaktor = 0.09 < 0,1 !

Bewertungskriterien	Gew.	MQ (J)	MNQ (S)	MNQ (W)	UZ < MNQ	UZ < MNQ	GWN (J)
MQ (J)	5.31%	1.00	0.20	0.33	0.20	0.33	1.00
MNQ (S)	28.13%	5.00	1.00	3.00	1.00	3.00	3.00
MNQ (W)	7.27%	3.00	0.33	1.00	0.20	0.33	0.33
UZ < MNQ (S)	34.88%	5.00	1.00	5.00	1.00	5.00	3.00
UZ < MNQ (W)	14.87%	3.00	0.33	3.00	0.20	1.00	3.00
GWN (J)	9.54%	1.00	0.33	3.00	0.33	0.33	1.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Anzahl = 6	100.0%	18.00	3.20	15.33	2.93	10.00	11.33

Zeilen- Norm. Eig.-Vek. (Eva*Wi) (Ri/Wi)

Ri	Wi	Ri'	Xi
0.330	0.055	0.353	6.428
1.692	0.282	1.872	6.640
0.467	0.078	0.487	6.254
2.022	0.337	2.327	6.906
0.899	0.150	1.005	6.703
0.591	0.098	0.643	6.534
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
6.00	1.00		39.47

Xi_max = 6.58
 CI = 0.12
 CR = 0.09
Konsistent
 Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

Wassernutzungen

Gewichtung

Inkonsistenzfaktor = 0.06 < 0,1 !

Bewertungskriterien	Gew.	TW aus G	BW aus G	BW aus O	Abwe.Klä	Abwe.Tren	Gew.zust.
TW aus GW	43.99%	1.00	7.00	9.00	5.00	5.00	3.00
BW aus GW	6.45%	0.14	1.00	3.00	1.00	1.00	0.20
BW aus OW	2.99%	0.11	0.33	1.00	0.33	0.33	0.14
Abw.Einleitung aus Kläranl.	6.37%	0.20	1.00	3.00	1.00	1.00	0.11
Abw.Einl. aus Trennsys.	6.37%	0.20	1.00	3.00	1.00	1.00	0.11
Gewässerzust. allgemein	33.84%	0.33	5.00	7.00	9.00	9.00	1.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Anzahl = 6	100.0%	1.99	15.33	26.00	17.33	17.33	4.57

Zeilen- Norm. Eig.-Vek. (Eva*Wi) (Ri/Wi)

Ri	Wi	Ri'	Xi
2.540	0.423	2.894	6.837
0.412	0.069	0.430	6.263
0.186	0.031	0.196	6.320
0.421	0.070	0.424	6.043
0.421	0.070	0.424	6.043
2.021	0.337	2.301	6.832
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
6.00	1.00		38.34

Xi_max = 6.39
 CI = 0.08
 CR = 0.06
Konsistent
 Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

A.4.4. Testgebiet Obere Iller

Tabelle A 19: Übersicht Klimaszenarien Obere Iller 1/2

Wasserdargebot Obere Iller												
2021-2050	W_A1B_f	W_A1B_t	W_A2_f	W_A2_t	W_B1_f	W_B1_t	R_A1B	R_A2	R_B1	Min	Max	
Kempten	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
MHQ (J)	98.49	100.94	94.40	108.59	109.99	93.33	110.71	106.74	111.37	93.3	111.4	
(S)	95.47	97.95	95.15	111.25	110.99	94.16	104.37	105.64	104.51	94.2	111.2	
(W)	102.52	109.91	94.96	97.73	104.95	106.27	105.21	89.44	107.91	89.4	109.9	
MQ (J)	94.64	97.90	95.34	99.59	104.06	101.15	106.83	100.22	109.91	94.6	109.9	
(S)	86.72	93.04	89.21	94.57	97.01	93.49	100.52	97.62	106.08	86.7	106.1	
(W)	116.60	111.45	112.36	113.58	123.63	122.57	137.46	112.91	128.57	111.4	137.5	
MNQ (J)	99.88	108.62	105.30	106.76	110.95	116.00	126.99	111.55	122.70	99.9	127.0	
(S)	79.52	94.22	85.47	91.20	92.46	94.79	98.38	90.51	98.36	79.5	98.4	
(W)	109.15	108.83	110.58	110.79	118.88	116.32	132.20	116.71	124.80	108.8	132.2	
HHQ (J)	98.04	106.85	80.96	110.23	101.55	90.72	127.77	118.98	175.15	81.0	175.2	
(S)	98.04	106.85	80.96	110.23	101.55	90.72	127.77	110.41	136.27	81.0	136.3	
(W)	68.64	118.60	74.61	88.49	68.35	99.18	122.53	122.55	180.40	68.4	180.4	
NNQ (J)	96.27	101.19	96.79	114.21	99.33	92.06	77.12	125.77	136.55	77.1	136.6	
(S)	76.00	104.15	72.93	88.41	81.45	87.29	98.22	94.62	128.39	72.9	128.4	
(W)	96.27	101.19	96.79	114.21	99.33	92.06	77.12	125.77	136.55	77.1	136.6	
UZ < MNQ (J)	62.70	49.84	32.79	42.52	25.82	45.22	126.42	136.46	68.78	25.8	136.5	
(S)	8000.00	30.30	7333.33	148.48	2000.00	184.85	6333.33	7000.00	0.00	0.0	8000.0	
(W)	52.87	50.92	23.77	36.64	23.36	37.48	122.27	131.88	68.78	23.4	131.9	
GWN (J)	97.90	101.61	99.90	102.92	105.19	105.12	109.42	102.08	111.75	97.9	111.8	
(S)	84.28	93.80	89.26	95.02	95.37	98.89	103.98	95.70	108.07	84.3	108.1	
(W)	114.04	110.17	112.51	111.59	116.82	111.96	118.77	113.06	118.09	110.2	118.8	
L-Temp (J)	115.19	114.63	115.03	115.92	112.58	113.44	122.15	118.36	115.96	112.6	122.1	
(S)	108.62	110.05	109.14	109.54	106.69	107.92	113.37	110.88	108.79	106.7	113.4	
(W)	219.83	193.58	208.84	225.90	206.33	208.48	6576.32	5617.16	5380.85	193.6	6576.3	
W-Temp (J)	115.19	114.63	115.03	115.92	112.58	113.44	122.15	118.36	115.96	112.6	122.1	
(S)	108.62	110.05	109.14	109.54	106.69	107.92	113.37	110.88	108.79	106.7	113.4	
(W)	219.83	193.58	208.84	225.90	206.33	208.48	6576.32	5617.16	5380.85	193.6	6576.3	
Niederschlag (J)	96.54	99.37	96.88	100.81	103.07	101.11	105.66	102.20	107.36	96.5	107.4	
(S)	90.24	95.18	92.97	97.36	98.69	97.64	106.40	106.86	108.65	90.2	108.6	
(W)	103.34	104.14	101.10	104.74	107.79	105.07	105.03	98.18	106.25	98.2	107.8	
2071-2100												
MHQ (J)	89.14	91.32	76.50	80.39	86.95	103.16	98.58	100.37	109.96	76.5	110.0	
(S)	70.02	67.30	66.88	72.82	72.68	81.70	76.73	87.63	98.86	66.9	98.9	
(W)	131.52	137.47	110.78	117.79	121.98	133.75	140.32	127.44	118.75	110.8	140.3	
MQ (J)	85.05	86.09	79.52	83.38	83.48	86.57	89.40	93.87	98.33	79.5	98.3	
(S)	63.40	61.98	60.81	64.57	63.17	67.57	66.98	74.93	85.14	60.8	85.1	
(W)	145.18	153.39	131.49	135.91	139.87	139.60	198.80	186.31	162.66	131.5	198.8	
MNQ (J)	95.86	104.13	93.18	101.21	96.93	96.31	112.38	101.63	128.91	93.2	128.9	
(S)	72.51	74.92	66.56	72.19	70.76	72.75	67.19	62.14	96.27	62.1	96.3	
(W)	124.16	130.74	114.22	114.42	129.30	115.80	152.39	135.15	145.01	114.2	152.4	
HHQ (J)	80.28	115.28	64.43	87.00	81.39	103.26	180.85	137.06	145.87	64.4	180.8	
(S)	66.20	78.19	57.35	87.00	81.39	103.26	111.76	99.69	116.66	57.3	116.7	
(W)	117.46	170.00	94.27	112.71	104.46	131.99	186.26	141.16	150.23	94.3	186.3	
NNQ (J)	87.99	103.29	86.15	72.52	101.97	99.81	86.46	107.86	109.73	72.5	109.7	
(S)	57.57	84.49	56.37	54.63	67.18	79.93	59.38	74.09	85.73	54.6	85.7	
(W)	100.43	103.29	113.37	102.34	101.97	99.81	124.31	131.00	109.73	99.8	131.0	
UZ < MNQ (J)	77.05	47.13	72.95	75.16	53.69	73.73	74.24	91.70	36.03	36.0	91.7	
(S)	57000	591	48333	833	35667	921	80667	91333	9667	591	91333	
(W)	6.97	16.97	13.52	33.11	9.84	26.72	21.40	31.88	29.69	7.0	33.1	
GWN (J)	93.28	94.50	88.75	91.25	91.70	93.37	98.50	97.25	105.32	88.8	105.3	
(S)	67.20	67.77	61.61	64.71	69.00	65.60	62.13	58.38	83.44	58.4	83.4	
(W)	124.19	123.83	120.92	120.39	118.60	123.86	161.04	164.09	142.94	118.6	164.1	
L-Temp (J)	136.81	140.64	134.60	134.06	131.47	134.76	173.58	168.95	147.22	131.5	173.6	
(S)	117.59	121.50	117.38	118.25	117.12	119.10	139.93	137.83	125.65	117.1	139.9	
(W)	443	471	409	407	360	405	24948	23075	16021	360	24948	
W-Temp (J)	136.81	140.64	134.60	134.06	131.47	134.76	173.58	168.95	147.22	131.5	173.6	
(S)	117.59	121.50	117.38	118.25	117.12	119.10	139.93	137.83	125.65	117.1	139.9	
(W)	443	471	409	407	360	405	24948	23075	16021	360	24948	
Niederschlag (J)	89.86	92.07	85.70	89.54	88.51	92.00	93.38	100.16	99.56	85.7	100.2	
(S)	81.52	82.64	76.39	81.79	81.57	81.44	80.97	89.48	96.57	76.4	96.6	
(W)	98.86	102.81	95.75	98.36	95.98	104.02	104.10	109.39	102.15	95.8	109.4	

Tabelle A 22: Bewertung Wasserdargebot Obere Iller 2/2

W-Temp (W)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	115	Bew. Bew.		Bew. Bew.	
Bandbreite [%]	-2													
193.6 bis 24948	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	95	Gew. Gew.		Gew. Gew.	
Klimaszenario:	0													
2021-50 / 2071-210:	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	90	Ges. Ges.		Ges. Ges.	
219.8 443	2													
	3													
Niederschlag (W)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.	120	Bew. Bew.		Bew. Bew.	
Bandbreite [%]	-2													
95.8 bis 109	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.	100	Gew. Gew.		Gew. Gew.	
Klimaszenario:	0													
2021-50 / 2071-210:	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.	95	Ges. Ges.		Ges. Ges.	
103.3 99	2													
Kontrolle Gewichtung:	3													
		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00		1.00 1.00
Bewertung: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)														

Wasserdargebot Auswertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung TW aus GW	Hochwasserschutz HWS	Gewässerzustand Gew.zustand allgemein	Gewässerzustand Naturschutz Fischerei	Gewässerzustand Abw.Eintl. aus Kläranl.
Dargebot Heute:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dargebot 2021-2050:	-2,4	0,0	-0,3	-0,6	0,1	-2,5	-2,9
Dargebot 2071-2100:	-2,5	-0,1	-0,3	0,5	-0,2	-3,0	-3,0
Ergebnisbandbreite: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)							

Tabelle A 23: Bewertung Wasserbedarf und Zustandsbewertung Obere Iller

Zustandsbewertung - Wasserbedarf (ohne Maßnahmen)

Wasserbedarf Bewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung TW aus GW	Hochwasserschutz HWS	Gewässerzustand Gew.zustand allgemein	Gewässerzustand Naturschutz Fischerei	Gewässerzustand Abw.Eintl. aus Kläranl.
heute	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bev.Entw.	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2						
0.0 bis 0	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.
Klimaszenario:	0						
2021-50 / 2071-210:	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.
88.4 88	2						
	3						
L-Temp (S)	-3		Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.
Bandbreite [%]	-2						
106.7 bis 140	-1		Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.
Klimaszenario:	0						
2021-50 / 2071-210:	1		Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.
108.6 118	2						
	3						
Okon.Sw - Energieversorgung			Bew. Bew.		Bew. Bew.		Bew. Bew.
...			Gew. Gew.		Gew. Gew.		Gew. Gew.
Punktbewertung:			Ges. Ges.		Ges. Ges.		Ges. Ges.
2021-50 / 2071-2100:							
Kontrolle Gewichtung:							
	0,00 0,00	0,00 0,00	1,00 1,00	0,00 0,00	1,00 1,00	1,00 1,00	0,00 0,00
Bewertung: +3 (es wird weniger Wasser benötigt als heute vorhanden), +2, +1, 0 (zufriedenstellend), -1, -2, -3 (es wird mehr Wasser benötigt als heute vorhanden)							

Wasserbedarf Auswertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung TW aus GW	Hochwasserschutz HWS	Gewässerzustand Gew.zustand allgemein	Gewässerzustand Naturschutz Fischerei	Gewässerzustand Abw.Eintl. aus Kläranl.
Bedarf Heute:	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bedarf 2021-2050:	0,0	0,0	1,5	0,0	-1,3	-1,0	0,0
Bedarf 2071-2100:	0,0	0,0	1,5	0,0	-2,6	-1,0	0,0
Ergebnisbandbreite: +3 (es wird weniger Wasser benötigt als heute vorhanden), +2, +1, 0 (zufriedenstellend), -1, -2, -3 (es wird mehr Wasser benötigt als heute vorhanden)							

Zustandsbewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung TW aus GW	Hochwasserschutz HWS	Gewässerzustand Gew.zustand allgemein	Gewässerzustand Naturschutz Fischerei	Gewässerzustand Abw.Eintl. aus Kläranl.
Zustand heute (ohne Maßnahmen)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-2,4	0,0	1,2	-0,6	-1,2	-3,0	-2,9
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2,5	-0,1	1,2	0,5	-2,8	-3,0	-3,0
Ergebnisbandbreite (ohne Maßnahme): +3 (äußerst gut), -3 (äußerst schlecht)							

Tabelle A 24: Maßnahmenbewertung Obere Iller

Maßnahmenbewertung								
Anpassungsmöglichkeit Bewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung TW aus GW	Hochwasserschutz HWS	Gewässerzustand Gew.zustand allgemein	Gewässerzustand Naturschutz Fischerei	Gewässerzustand Abw.Einl. aus Kläranl.	
	1.00	Gewichtung: 0.03	Gewichtung: 0.03	Gewichtung: 0.29	Gewichtung: 0.14	Gewichtung: 0.30	Gewichtung: 0.15	Gewichtung: 0.06
Maßnahme 1: Öffentlichkeitsarbeit im Umgang mit TW	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.
Nutzen kurz/mittelfristig			0.0	3.0				
Nutzen langfristig			1.0	0.20				
Beitrag zum Klimaschutz			2.0	0.30				
Resilienz (langf.anpassbar)			2.0	0.10				
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)			0.0	0.10				
Bewertung: 0.29	0.0	0.00	1.0	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 2: Regenwassernutzung	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.
Nutzen kurz/mittelfristig			1.0	3.0				
Nutzen langfristig			2.0	0.20				
Beitrag zum Klimaschutz			2.0	0.30				
Resilienz (langf.anpassbar)			1.0	0.10				
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)			0.0	0.10				
Bewertung: 0.43	0.0	0.00	1.5	1.00	0.0	0.00	0.0	0.00
Maßnahme 3: 2-ten Polder bauen	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.
Nutzen kurz/mittelfristig				0.0				
Nutzen langfristig				3.0				
Beitrag zum Klimaschutz				0.0				
Resilienz (langf.anpassbar)				1.0				
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)				-3.0				
Bewertung: -0.19	0.0	0.00	0.0	0.00	-1.4	1.00	0.0	0.00
Maßnahme 4: Speicher für NW-Aufhöhung bauen	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.
Nutzen kurz/mittelfristig				0.0				
Nutzen langfristig				3.0				
Beitrag zum Klimaschutz				0.0				
Resilienz (langf.anpassbar)				1.0				
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)				-3.0				
Bewertung: -0.42	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	-1.4	1.00
Maßnahme 5: Einleitungsgrenzwerte W-Temp anpassen	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.
Nutzen kurz/mittelfristig						1.0		
Nutzen langfristig						3.0		
Beitrag zum Klimaschutz						0.0		
Resilienz (langf.anpassbar)						3.0		
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)						-3.0		
Bewertung: 0.11	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.7	1.00
Maßnahme 6: Düngemanagement anpassen	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.	Gew.
Nutzen kurz/mittelfristig						3.0		
Nutzen langfristig						3.0		
Beitrag zum Klimaschutz						0.0		
Resilienz (langf.anpassbar)						3.0		
Nutzungskonflikte (Umsetzbarkeit)						-1.0		
Bewertung: 0.22	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	1.4	1.00

Bewertung: +3 (äußerst gut), +2 (sehr gut), +1 (gut), 0 (zufriedenstellend), -1 (schlecht), -2 (sehr schlecht), -3 (äußerst schlecht)

Tabelle A 25: Übersicht Zustandsbewertung Obere Iller

Zustandsbewertung	Energieerzeuger Wasserkraftanlagen	Wasserversorgung BW aus GW	Wasserversorgung TW aus GW	Hochwasserschutz HWS	Gewässerzustand Gew.zustand allgemein	Gewässerzustand Naturschutz Fischerei	Gewässerzustand Abw.Einl. aus Kläranl.
W-A1B (fe)							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-2.4	0.0	1.2	-0.6	-1.2	-3.0	-2.9
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.5	-0.1	1.2	0.5	-2.8	-3.0	-3.0
W-A1B (tr)							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-0.9	0.0	1.4	-0.8	-0.8	-3.0	0.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.4	-0.1	0.9	-0.3	-3.0	-3.0	-3.0
W-A2 (fe)							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-2.2	0.0	1.8	-0.2	-1.1	-3.0	-2.4
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.5	-0.2	0.8	2.4	-2.9	-3.0	-3.0
W-A2 (tr)							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	-0.1	0.1	1.8	-1.1	-0.9	-3.0	-1.7
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.4	-0.2	0.3	1.1	-2.7	-3.0	-3.0
W-B1 (fe)							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.8	0.2	1.6	-1.4	-0.3	-3.0	-1.7
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.4	-0.2	1.4	1.8	-3.0	-3.0	-3.0
W-B1 (tr)							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.3	0.2	1.6	-0.6	-0.3	-3.0	-1.4
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.5	-0.1	0.9	-0.8	-3.0	-3.0	-3.0
R-A1B							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	1.7	0.3	1.0	-1.1	-2.8	-3.0	-1.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.3	0.0	0.6	-0.7	-2.2	-3.0	-3.0
R-A2							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.2	0.1	2.0	0.3	-2.3	-3.0	-1.8
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.4	-0.1	1.2	-1.3	-3.0	-3.0	-3.0
R-B1							
Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	2.8	0.4	2.6	-1.3	-0.2	-3.0	0.0
Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-0.6	0.2	1.7	-0.8	-2.6	-3.0	-1.5
9 Szenarien (Mittelwert)							
Mittelwert - Zustand 2021-2050 (ohne Maßnahmen)	0.0	0.1	1.7	-0.8	-1.1	-3.0	-1.4
Mittelwert - Zustand 2071-2100 (ohne Maßnahmen)	-2.2	-0.1	1.0	0.2	-2.8	-3.0	-2.8

Tabelle A 26: Kriteriengewichtung Obere Iller

Gewichtung Wasserbedarf - Indikatoren

TW aus GW		Evaluationsergebnis (Eva)						
Inkonsistenzfaktor = 0.12		< 0,1 !						
Bewertungskriterien	Gew.	HHQ (J)	NNQ (J)	GWN (J)				
HHQ (J)	13.5%	1.00	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
NNQ (J)	28.1%	3.00	1.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
GWN (J)	58.4%	3.00	3.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Anzahl = 3	100.0%	7.00	4.33	1.67	1.00	1.00	1.00	1.00

Zellen-	Norm.	(Eva*Wj)		(Ri/Wi)
summe	Eig.-Vek.	Ri	Xi	
Ri	Wi			
0.420	0.140	0.427	3.049	
0.859	0.286	0.897	3.133	
1.721	0.574	1.853	3.230	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
3.00	1.00		9.41	

Xi_max = 3.14
 CI = 0.07
 CR = 0.12
 grenzwertig !
 Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

Naturschutz Fischerei		Evaluationsergebnis (Eva)						
#DIV/0!		< 0,1 !						
Bewertungskriterien	Gew.	W-Temp (S)	W-Temp (W)					
W-Temp (S)	50.0%	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W-Temp (W)	50.0%	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Anzahl = 2	100.0%	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Zellen-	Norm.	(Eva*Wj)		(Ri/Wi)
summe	Eig.-Vek.	Ri	Xi	
Ri	Wi			
1.000	0.500	1.000	2.000	
1.000	0.500	1.000	2.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
2.00	1.00		4.00	

Xi_max = 2.00
 CI = 0.00
 CR = #DIV/0!
 #DIV/0!
 Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

Abw.Einl. aus Kläranl.		Evaluationsergebnis (Eva)						
Inkonsistenzfaktor = 0.00		< 0,1 !						
Bewertungskriterien	Gew.	MNQ (S)	UZ < MNQ (S)	GWN (S)				
MNQ (S)	58.2%	1.00	2.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UZ < MNQ (S)	30.9%	3.50	1.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GWN (S)	10.9%	0.20	0.33	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Anzahl = 3	100.0%	1.70	3.33	9.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Zellen-	Norm.	(Eva*Wj)		(Ri/Wi)
summe	Eig.-Vek.	Ri	Xi	
Ri	Wi			
1.744	0.581	1.747	3.006	
0.927	0.309	0.929	3.004	
0.329	0.110	0.329	3.001	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	0.000	0.000	0.000	
3.00	1.00		9.01	

Xi_max = 3.00
 CI = 0.00
 CR = 0.00
 Konsistent !
 Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1

Gewichtung Wassernutzungen

Gewichtung		Evaluationsergebnis (Eva)						
Inkonsistenzfaktor = 0.04		< 0,1 !						
Bewertungskriterien	Gew.	WKA	Kühlwasser	TW aus GW	HWS	Gew.zustand	Fischerei	AW aus KA
Wasserkraftanlagen	3.2%	1.00	1.00	0.20	0.20	0.14	0.20	0.33
BW aus GW	2.7%	1.00	1.00	0.14	0.14	0.11	0.14	0.33
TW aus GW	28.7%	5.00	7.00	1.00	3.00	1.00	3.00	5.00
HWS	13.8%	5.00	7.00	0.33	1.00	0.33	1.00	3.00
Gew.zustand allgemein	30.3%	7.00	9.00	1.00	3.00	1.00	3.00	5.00
Naturschutz Fischerei	15.4%	5.00	7.00	0.33	1.00	0.33	1.00	5.00
Abw.Einl. aus Kläranl.	5.9%	3.00	3.00	0.20	0.33	0.20	0.20	1.00
	0.0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Anzahl = 7	100.0%	27.00	35.00	3.21	8.68	3.12	8.54	19.67

Zellen-	Norm.	(Eva*Wj)		(Ri/Wi)
summe	Eig.-Vek.	Ri	Xi	
Ri	Wi			
0.237	0.034	0.241	7.104	
0.196	0.028	0.198	7.084	
1.968	0.281	2.142	7.617	
0.981	0.140	1.040	7.427	
2.100	0.300	2.266	7.554	
1.082	0.155	1.165	7.534	
0.436	0.062	0.442	7.093	
0.000	0.000	0.000	0.000	
7.00	1.00		51.41	

Xi_max = 7.34
 CI = 0.06
 CR = 0.04
 Konsistent !
 Bewertung
 3 = 7/1
 2 = 5/1
 1 = 3/1
 0 = 1/1