| CLIMATE CHANGE | 10/2012

# Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel

## Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland

Umwelt Bundes Amt
Für Mensch und Umwelt

| CLIMATE CHANGE | 10/2012

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3709 41 121
UBA-FB 001593

# Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel

## Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland

von

**Jenny Tröltzsch, Benjamin Görlach**
Ecologic Institut, Berlin

**Helen Lückge, Martin Peter**
INFRAS – Forschung und Beratung, Zürich

**Christian Sartorius**
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
http://www.uba.de/uba-info-medien/4298.html
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4359

| | | |
|---|---|---|
| Durchführung der Studie: | Ecologic Institut gemeinnützige GmbH<br>Pfalzburger Str. 43/44<br>10717 Berlin | INFRAS AG<br>Binzstraße 23<br>8045 Zürich |
| | Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI<br>Breslauer Straße 48<br>76139 Karlsruhe | |
| Abschlussdatum: | Januar 2012 | |
| Herausgeber: | Umweltbundesamt<br>Wörlitzer Platz 1<br>06844 Dessau-Roßlau<br>Tel.: 0340/2103-0<br>Telefax: 0340/2103 2285<br>E-Mail: info@umweltbundesamt.de<br>Internet: http://www.umweltbundesamt.de<br>http://fuer-mensch-und-umwelt.de/ | |
| Redaktion: | Fachgebiet I 1.7 Kompass – Klimafolgen und Anpassung in Deutschland<br>Clemens Haße | |
| | Dessau-Roßlau, Juni 2012 | |

# Inhaltsverzeichnis


**1 Einleitung ..... 1**

**2 Methodik zur Bewertung und Auswahl von Anpassungsmaßnahmen ..... 2**

**2.1 Auswahl der untersuchten Anpassungsmaßnahmen ..... 2**

2.1.1 Auswahlkriterien ..... 3

2.1.2 Übersicht der untersuchten Anpassungsmaßnahmen ..... 5

**2.2 Kriterienset zur Bewertung der Anpassungsmaßnahmen ..... 7**

2.2.1 Grundinformation je Maßnahme ..... 8

2.2.2 Kosten- und Nutzenerfassung ..... 9

2.2.3 Beurteilungskriterien ..... 10

**3 Kosten-Nutzen-Bewertung der ausgewählten Anpassungsmaßnahmen ..... 12**

**3.1 Handlungsfeld Verkehr ..... 12**

3.1.1 Anpassungsmaßnahme „Neue Straßenbeläge/Fahrbahndecken“ ..... 12

3.1.2 Anpassungsmaßnahme „Anpassung der Schieneninfrastruktur an stärkere Temperaturschwankungen und Hitze“ ..... 21

3.1.3 Anpassungsmaßnahme „Wetterdienstleistungen in der Transportbranche“ ..... 28

**3.2 Handlungsfeld Raumplanung ..... 33**

3.2.1 Anpassungsmaßnahme „Freihaltung von Frischluftschneisen als Instrument der Raumplanung“ ..... 33

3.2.2 Anpassungsmaßnahme „Grüne Dächer“ ..... 44

3.2.3 Vertiefung: Anpassungsmaßnahme „Vorsorgende Raumplanung zum Schutz vor Hochwasser“ und Vergleich mit technischer Anpassungsoption ..... 50

**3.3 Handlungsfeld Finanzwirtschaft ..... 65**

3.3.1 Anpassungsmaßnahme „Bereitstellung neuer Versicherungsprodukte bzw. Integration neuer Risiken“ ..... 65

3.3.2 Anpassungsmaßnahme „Kooperationslösung Staat und Versicherungswirtschaft“ ..... 72

**3.4 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz ..... 77**

3.4.1 Anpassungsmaßnahme „Küstenschutz durch Deicherhöhung und Sandvorspülung“ ..... 77

3.4.2 Anpassungsmaßnahme „Vermeidung von Abwassereinleitungen in Gewässer durch zusätzliche Regenüberlaufbecken“..... 81

3.4.3 Vertiefung: Anpassungsmaßnahme „Anpassung der Kläranlagenablaufqualität an die reduzierte Wasserführung von Gewässern“ ..... 85

**3.5 Handlungsfeld Bauwesen ..... 96**

3.5.1 Anpassungsmaßnahme „Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren durch Anpassung im Wohnungsbau“ ..... 96

3.5.2 Anpassungsmaßnahme „Schutz von Gebäuden vor verstärkten Stürmen – Starkregen und Wind“ ..... 101

**3.6 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe ..... 105**

3.6.1 Anpassungsmaßnahme „Information von Unternehmen zur Anpassung an den Klimawandel“ ..... 105

3.6.2 Anpassungsmaßnahme „Vermeidung von hitzebedingten Produktivitätseinbußen durch Klimatisierung“..... 110

**3.7 Handlungsfeld Gesundheit ..... 115**

3.7.1 Anpassungsmaßnahme „Hitzewarnsystem“ ..... 115

3.7.2 Anpassungsmaßnahme „Kühlung von Krankenhäusern“ ..... 122

**3.8 Handlungsfeld Boden ..... 127**

3.8.1 Anpassungsmaßnahme „Bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden“ ..... 127

**3.9 Handlungsfeld Biologische Vielfalt ..... 131**

3.9.1 Anpassungsmaßnahme „Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung“ ..... 131

3.9.2 Vertiefung: Anpassungsmaßnahme „Renaturierung von Auenlandschaften“ ..... 134

**3.10 Handlungsfeld Landwirtschaft ..... 148**

3.10.1 Anpassungsmaßnahme „Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen“ ..... 148

3.10.2 Anpassungsmaßnahme „Einsatz angepasster Pflanzensorten“ .... 152

**3.11 Handlungsfeld Energie ..... 156**

3.11.1 Anpassungsmaßnahme „Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwettereignisse“ ..... 156

3.11.2 Anpassungsmaßnahme „Kühlung von thermischen Kraftwerken“. 161

**3.12 Handlungsfeld Tourismus ..... 165**

3.12.1 Anpassungsmaßnahme „Erhaltung der derzeitigen Tourismusangebote über Präparierung der Pisten“ ..... 165

3.12.2 Anpassungsmaßnahme „Diversifikation der Angebote im Tourismus zu Sommer- bzw. Alljahrestourismus“ ..... 170

**3.13 Handlungsfeld Bevölkerungsschutz ..... 173**

3.13.1 Anpassungsmaßnahme „Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen)“ ..... 173

3.13.2 Anpassungsmaßnahme „Überarbeitung von Katastrophenschutzplänen“ ..... 177

**4 Zusammenfassung und Ausblick ..... 181**

**5 Referenzen ..... 195**

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Anpassungsmaßnahmen ..... 5
Tabelle 2: Erwarteter Temperaturanstieg und Autobahnkilometer ..... 14
Tabelle 3: Mehrkosten durch Anpassung an den Klimawandel ..... 15
Tabelle 4: Erwartete Störungen der Straßeninfrastruktur durch Hitze ..... 16
Tabelle 5: Zeitkosten ..... 16
Tabelle 6: Erwartete zusätzliche Unfälle durch Hitze ..... 17
Tabelle 7: Eingesparte Reparaturkosten durch hitzebedingte Verformungen ..... 17
Tabelle 8: Kosten-Nutzen-Gegenüberstellung ..... 18
Tabelle 9: Auswertung der Maßnahme „Straßeninfrastruktur“ ..... 20
Tabelle 10: Erwarteter Kostenanstieg durch Anpassung der Schieneninfrastruktur ..... 23
Tabelle 11: Verspätungskosten durch temperaturbedingte Schienenverformungen in UK (mittlere Schätzung) ..... 24
Tabelle 12: Benefit transfer: Verspätungskosten in Deutschland (mittlere Schätzung) ..... 24
Tabelle 13: Zusammenfassung der jährlichen Nutzen der Maßnahme ..... 25
Tabelle 14: Auswertung der Maßnahme „Schieneninfrastruktur“ ..... 27
Tabelle 15: Zeitliche Relevanz von Wetterinformationen für Verkehrsträger ..... 28
Tabelle 16: Kosten von maßgeschneiderten Wetterinformationen für die Transportwirtschaft ..... 30
Tabelle 17: Auswertung der Maßnahme „Wetterdienstleistungen Transport“ ..... 32
Tabelle 18: Entgangene Bruttowertschöpfung und Steuereinnahmen im Gebiet Espan (Euro pro Jahr) ..... 37
Tabelle 19: Vermiedene Sterbefälle pro Jahr durch das Gebiet Espan ..... 38
Tabelle 20: Vermiedene Kosten durch Sterblichkeit durch Gebiet Espan ..... 39
Tabelle 21: Vermiedene Krankenhaus-Einweisungen und Gesundheitskosten (€/Jahr) ..... 39
Tabelle 22: Auswertung der Maßnahme „Frischluftschneisen“ ..... 43
Tabelle 23: Übersicht bisheriger Kosten-Nutzen Analysen von Gründächern (€/$m^2$) ..... 45
Tabelle 24: Notwendige Fördermittel zur Erhöhung des Gründachanteils auf 50% ..... 46
Tabelle 25: Nutzen von grünen Dächern über vermiedene Sterbefälle (pro Jahr) ..... 47
Tabelle 26: Auswertung der Maßnahme „grüne Dächer“ ..... 49
Tabelle 27: Übersicht Kosten- und Nutzenkomponente der Anpassungsoptionen ..... 55
Tabelle 28: Übersicht Entwicklung der Steuereinnahmen im Fallbeispiel ..... 55
Tabelle 29: Kostenschätzung Deichsanierung ..... 56
Tabelle 30: Übersicht Hochwasserschäden im Fallbeispiel ..... 58

Tabelle 31: Diskontierte Einnahmen und Schäden im BAU-Szenario .....59

Tabelle 32: Vergleich Nutzen-Kosten Verhältnis der beiden Anpassungsoptionen .....60

Tabelle 33: Nettobarwert und interner Zinsfuß der beiden Anpassungsoptionen .....62

Tabelle 34: Auswertung der Maßnahme „Raumplanerische Vorsorge und technische Maßnahmen zum Hochwasserschutz“.....64

Tabelle 35: Prämieneinnahmen und Erbringungskosten bei Versicherungspflicht .....68

Tabelle 36: Auswertung der Maßnahme “Neue Versicherungsprodukte – Elementarschadenversicherungspflicht“ .....71

Tabelle 37: Auswertung der Maßnahme „Kooperationslösung Staat und Versicherungswirtschaft“ .....76

Tabelle 38: Durch den Klimawandel verursachte wirtschaftliche Schäden im Bereich Küstenschutz und Kosten dagegen gerichteter Anpassungsmaßnahmen (in Mio. Euro/Jahr) bis 2085 im Szenario A2 bei mittlerem Meeresspiegelanstieg für Deutschland .....78

Tabelle 39: Auswertung der Maßnahme „Küstenschutz durch Deicherhöhung und Sandvorspülung“ .....80

Tabelle 40: Auswertung der Maßnahme „Vermeidung von Abwassereinleitungen in Gewässer durch zusätzliche Regenüberlaufbecken“ .....84

Tabelle 41: Grenzwerte der Nährstoffkonzentration im Ablauf von Kläranlagen aktuell und zur Erreichung einer Reduktion der Nährstofffrachten um 20 % .....87

Tabelle 42: Kostenansätze für die Anpassung kommunaler Kläranlagen an unterschiedliche Ablaufgrenzwerte für die Nährstoffe P und N im Szenario A1.....88

Tabelle 43: Abwassermengen (in Mrd. $m^3$), die den Kläranlagen verschiedener Größenklassen im Elbegebiet und Deutschland zugeführt werden (DeStatis 2009) .....89

Tabelle 44: Auswertung der Maßnahme „Anpassung der Kläranlagenablaufqualität an die reduzierte Wasserführung der Einleitgewässer“ .....95

Tabelle 45: Auswertung der Maßnahme „Hitzeanpassung im Wohnungsbau“.....100

Tabelle 46: Auswertung der Maßnahme „Schutz von Gebäuden vor verstärkten Stürmen – Starkregen und Wind“.....104

Tabelle 47: Kosten für Einrichtung, Betrieb und Pflege KomPass-Webseite.....106

Tabelle 48: Kosten für Beratung .....107

Tabelle 49: Auswertung der Maßnahme „Information von Unternehmen zu Klimaanpassung“ .....109

Tabelle 50: Zunahme von Sommer- und heißen Tagen in verschiedenen Klimaszenarien bis 2100 und daraus ohne Gegenmaßnahmen resultierende Produktivitätsverluste .....112

Tabelle 51: Auswertung der Maßnahme „Vermeidung von Produktivitätseinbußen durch Kühlung“.....114

Tabelle 52: Anzahl der vermiedenen Hitzetoten durch Hitzewarnsystem (2071-2100) .....117

Tabelle 53: Berechnung des Nutzens des Hitzewarnsystems.....119

Tabelle 54: Auswertung der Maßnahme „Hitzewarnsystem“ ..... 121
Tabelle 55: Kostenberechnung der Kühlung in Krankenhäusern ..... 123
Tabelle 56: Nutzenberechnung der Kühlung von Krankenhäusern ..... 124
Tabelle 57: Auswertung der Maßnahme „Kühlung von Krankenhäusern“ ..... 126
Tabelle 58: Auswertung der Maßnahme „Bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden“ ..... 130
Tabelle 59: Auswertung der Maßnahme „Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung“ ..... 133
Tabelle 60: Deichbau und -rückbaukosten ..... 138
Tabelle 61: Deckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Nutzung ..... 140
Tabelle 62: Ertragsverlust durch Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzung im Fallbeispiel ..... 140
Tabelle 63: Kosten für die Anpflanzung von Auenwald ..... 141
Tabelle 64: Kosten und Nutzen des Fallbeispiels zur Renaturierung von Auenflächen ..... 144
Tabelle 65: Differenz zwischen Minimum- /Maximum-Szenario ..... 145
Tabelle 66: Auswertung der Maßnahme „Renaturierung von Auenlandschaften“ ..... 147
Tabelle 67: Beregnungsfläche ..... 149
Tabelle 68: Kosten für Bewässerung ..... 149
Tabelle 69: Auswertung der Maßnahme „Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen“ ..... 151
Tabelle 70: Auswertung der Maßnahme „Einsatz von angepassten Pflanzensorten“ ..... 155
Tabelle 71: Kostenberechnung für Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwettereignisse ..... 158
Tabelle 72: Auswertung der Maßnahme „Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwettereignisse“ ..... 160
Tabelle 73: Auswertung der Maßnahme „Kühlung von thermischen Kraftwerken“ ..... 164
Tabelle 74: Beschneite Fläche ..... 166
Tabelle 75: Unterhaltungskosten der beschneiten Fläche ..... 167
Tabelle 76: Landkreise in Bayern mit ausgeprägtem Wintertourismus ..... 167
Tabelle 77: Auswertung der Maßnahme „Erhaltung der derzeitigen Tourismusangebote über Präparierung der Pisten“ ..... 169
Tabelle 78: Auswertung der Maßnahme „Diversifikation der Angebote im Tourismus zu Sommer- bzw. Alljahrestourismus“ ..... 172
Tabelle 79: Auswertung der Maßnahme „Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen)“ ..... 176
Tabelle 80: Kosten der Erstellung von Katastrophenschutzpläne für Landkreise und kreisfreien Städte in Deutschland ..... 178

Tabelle 81: Kosten Katastrophenschutzpläne.....179
Tabelle 82: Auswertung der Maßnahme „Überarbeitung von Katastrophenschutzplänen“..180
Tabelle 83: Übersicht der Kosten-Nutzen-Betrachtung der untersuchten Anpassungsmaßnahmen.....185
Tabelle 84: Einordnung der Maßnahmen nach Relevanz und No-regret/regret .....190

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensweise bei Auswahl und Bewertung der Anpassungsmaßnahmen .... 2
Abbildung 2: Mindestanforderungen für Auswahlkategorien ..... 4
Abbildung 3: Überblick des Kriteriensets .....11
Abbildung 4: Beschädigte Betonplatten auf der A29 im Sommer 2010 .....13
Abbildung 5: Das Gebiet Espan in Stuttgart Bad Cannstatt .....35
Abbildung 6: Flächennutzungsplanung im Gebiet Espan 1974-2010 .....36
Abbildung 7: Fallbeispiel raumplanerische Vorsorge - Ausgangssituation .....51
Abbildung 8: Alternative Handlungsoptionen .....52
Abbildung 9: Schritte der vergleichenden Analyse von Anpassungsmaßnahmen .....54
Abbildung 10: Wohngebäude: Verträge mit Elementareinschluss.....67
Abbildung 11: Informationsanzeige der Kampagne im Bundesland Bayern .....75
Abbildung 12: Garbeniederung  mit vorgeschlagenen Deichschlitzungen.....136
Abbildung 13: Verwendetes Kriterienset.....182
Abbildung 14: Anpassungsmaßnahmen nach Kosten-Nutzen-Verhältnis gruppiert .....188
Abbildung 15: Untersuchte Maßnahmen eingeteilt nach Relevanz, zeitlicher Dringlichkeit und Kosten-Nutzen-Verhältnis.....191
Abbildung 16: Darstellung weiterer Kriterien.....192

# 1 Einleitung

Die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) wurde am 17. Dezember 2008 vom Bundeskabinett verabschiedet. Die DAS dokumentiert den Sachstand von Anpassungsnotwendigkeiten und beginnenden Aktivitäten in den einzelnen Handlungsfeldern und zeichnet den Weg für die weitere Konkretisierung der deutschen Klima-Anpassungspolitik vor. Die DAS umfasst 15 Handlungsfelder, worunter eine Reihe von Wirtschaftssektoren, wie Land- und Forstwirtschaft, die Energie- und Wasserversorgung oder die Versicherungsbranche, fallen. Darüber hinaus ist auch der öffentliche Sektor, u.a. über den Küsten- und Hochwasserschutz und die Verkehrsinfrastruktur betroffen. Die Folgen des Klimawandels, wie zu erwartende höhere Temperaturen, eine Veränderung der Niederschlagsverteilung, die Erhöhung des Meeresspiegels und der Windverhältnisse, betreffen insbesondere auch nicht-marktgängige Güter, z.B. die menschliche Gesundheit oder die Biologische Vielfalt.

Die in der DAS enthaltenen Maßnahmen basieren auf sektoralen bzw. schutzgutbezogenen Einzelbetrachtungen. Eine handlungsfeldübergreifende Kosten-Nutzen-Betrachtung, die für die Evaluierung unterschiedlicher Politikoptionen notwendig ist, erfolgte bisher nicht. Eine ökonomische Analyse der Anpassung an den Klimawandel soll diese Lücke schließen. Bei der Abschätzung von Kosten und Nutzen der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel treten allerdings diverse Probleme auf, z.B. fließen zahlreiche komplexe und unsichere Faktoren ein und es sind verschiedene Anpassungspfade für Auswirkungen des Klimawandels möglich.

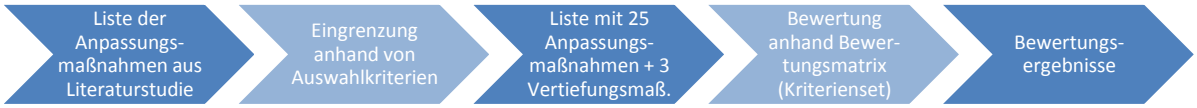
Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt ein Konsortium aus Ecologic Institut, INFRAS und Fraunhofer-ISI beauftragt, im Rahmen des Ufoplan-Projekts Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel (FKZ 3709 41 121) die ökonomischen Aspekte der Anpassung an den Klimawandel zu untersuchen. In einer ersten Projektphase wurde bereits der aktuelle Wissensstand zum Thema zusammengetragen, aufbereitet und vereinheitlicht. Die zweite Projektphase dient der Schließung von Wissenslücken und der Erweiterung der Informationsbasis. Der Fokus der zweiten Phase liegt auf der Methodik, um Anpassungsmaßnahmen vergleichbar zu machen. Dabei werden Kriterien zum Vergleich unterschiedlicher Anpassungsmaßnahmen entwickelt und die (ökonomische) Informationsbasis, besonders zu Kosten und Nutzen der Anpassung, konsolidiert, vereinheitlicht und erweitert. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der zweiten Projektphase zusammen und zeigt dabei Lösungsansätze für eine handlungsfeldübergreifende Kosten-Nutzen-Betrachtung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf.

# 2 Methodik zur Bewertung und Auswahl von Anpassungsmaßnahmen

Im ersten Arbeitspaket des Projekts wurde der vorhandene Wissensstand zum Thema ökonomische Bewertung der Anpassung an den Klimawandel anhand einer Literaturauswertung erarbeitet, vereinheitlicht und bewertet. Die Literaturstudie erfolgte anhand der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie (siehe Tröltzsch et al. 2011[1]). Auf Basis der Literaturstudie wurden darüber hinaus detaillierte Bewertungen von ausgewählten Anpassungsmaßnahmen aus verschiedenen Handlungsfeldern durchgeführt. Ziel der Bewertungen der einzelnen Anpassungsmaßnahmen ist eine vergleichende Darstellung der Maßnahmen zu ermöglichen und zwar mit Fokus auf die Kosten- und Nutzenaspekte. Dieser Zwischenbericht stellt die Ergebnisse der Bewertungen zusammen.

Zur Bewertung der einzelnen Anpassungsmaßnahmen wurde als erstes auf Grundlage der Literaturauswertung eine Liste von Anpassungsmaßnahmen aller Handlungsfelder angefertigt. Diese umfangreiche Liste wurde anhand von vorab festgelegten Auswahlkriterien auf 25 zu untersuchende Anpassungsmaßnahmen reduziert. Die Bewertung fand für diese Auswahl von Anpassungsmaßnahmen anhand der entwickelten Bewertungsmatrix (Kriterienset) statt. Neben den 25 Anpassungsmaßnahmen wurden drei Maßnahmen vertieft analysiert. Diese Vertiefungsthemen sind Maßnahmen, die einen stärker integrativen Charakter zwischen verschiedenen Handlungsfeldern aufweisen und bei denen bisher eine geringere klimawandelspezifische Datenbasis vorliegt, die durch die Bearbeitung vertieft wird.

**Abbildung 1: Vorgehensweise bei Auswahl und Bewertung der Anpassungsmaßnahmen**




Im Folgenden werden die Auswahlkriterien und die Bewertungsmatrix vorgestellt.

## 2.1 Auswahl der untersuchten Anpassungsmaßnahmen

Um geeignete Anpassungsmaßnahmen für die Bewertung zu finden, wurden in einem ersten Schritt die aus der Literaturstudie Tröltzsch et al. 2011 gewonnenen Anpassungsmaßnahmen auf ihre Eignung für die weitere Analyse untersucht. Das größte Problem dabei ist, dass für einen Großteil der möglichen Anpassungsmaßnahmen in Deutschland bisher keine zufrieden stellende Datenlage vorhanden ist. Zum Teil fehlen für die Anpassungsmaßnahmen bereits praktikable Bewertungsmethoden, z.B. in den Handlungsfeldern Biodiversität und Forstwirtschaft. In anderen Bereichen können Bewertungen zwar methodisch vorgenommen werden, allerdings ist die Datenlage momentan noch sehr lückenhaft. Die Eingrenzung fand deshalb anhand ausgewählter

[1] Die Literaturstudie ist unter: http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4185.html zu finden.

Kriterien statt, um trotz der vorliegenden Datenlage eine aussagekräftige Bewertung vornehmen zu können.

### 2.1.1 Auswahlkriterien

Um die für die weitere Untersuchung genutzten Anpassungsmaßnahmen auszuwählen, wurden verschiedene Auswahlkriterien herangezogen. Anhand derer wurde entschieden, ob eine Maßnahme ausführlich anhand des Kriteriensets analysiert werden soll. Die Untersuchung der Maßnahmen anhand der im Folgenden dargestellten Kriterien, basiert auf einer Literaturauswertung und auf der Einschätzung von Experten. Die Kriterien für die Auswahl der Maßnahmen überschneiden sich teilweise mit den Beurteilungskriterien des Kriteriensets (siehe Kapitel 2.2). Allerdings ist hier das Ziel keine Untersuchung im Hinblick auf die Anpassungsthematik, sondern eine Einschätzung der einzelnen Maßnahmen auf die Durchführbarkeit der Kosten-Nutzen-Analyse, so dass Kriterien wie die Datenverfügbarkeit eine größere Bedeutung aufweisen.

Als erstes zentrales Auswahlkriterium wurde die **Relevanz** der Anpassungsmaßnahme gewählt, welche anhand der Ausprägungen hoch, mittel, gering bewertet wurde. Das Kriterium hatte dabei für die spätere Auswahl der Maßnahmen eine sehr hohe Bedeutung, z.B. ist bei einer Einteilung in die Gruppe „geringe Relevanz“ eine weitere Untersuchung ausgeschlossen.

Ein weiteres zentrales Kriterium ist die **Quantifizierbarkeit** der Maßnahmen (Ausprägungen: gut, grob, schlecht). Eine weitere Betrachtung einer Maßnahme ist nur zielführend, wenn bereits Ansätze zur Quantifizierung bestehen. Die Betrachtung erfolgte getrennt für die Kosten und den Nutzen einer Maßnahme. Hier fließt ebenfalls ein, ob Überschneidungen mit anderen Maßnahmen vorliegen oder verschiedene Effekte, z.B. Einflüsse anderer Maßnahmen und Auswirkungen aufgrund anderer politischer Instrumente, nur schwierig zu trennen sind.

Die Quantifizierbarkeit einer Maßnahme steht im engen Zusammenhang mit dem weiteren Kriterium der **Datenverfügbarkeit**. Für dieses Kriterium wurde untersucht, ob ausreichend Informationen vorliegen, um Kosten und Nutzen einer Maßnahme abzuschätzen. Die Beurteilung erfolgte mit den Kategorien: gut, mittel und schlecht.

Die **zeitliche Dringlichkeit** wurde als weiteres Kriterium genutzt. Dabei soll abgedeckt werden, in welchem Rahmen der aktuelle Handlungsbedarf vorliegt. Hier wurde sowohl einbezogen, ob die Maßnahme aufgrund der Ausprägungen des Klimawandels erst in einigen Jahren notwendig ist und ob eine Maßnahme eine lange Umsetzungsdauer benötigt bzw. ab wann die Wirkung nach Umsetzung der Maßnahmen eintritt. Das Kriterium wurde mit hoch, mittel, gering bewertet.

Ebenfalls wurde untersucht, inwieweit eine Vertiefung einen **Mehrwert gegenüber der derzeitigen Datenlage** bietet (Ausprägungen: hoch, mittel, gering). Bei der Analyse der Anpassungsmaßnahmen sollen solche Maßnahmen vorrangig betrachtet werden, die in der Literatur bisher noch nicht umfassend behandelt wurden, wobei dies aber auf Basis der aktuellen Datenlage möglich ist. Ausgeschlossen werden damit Anpassungsmaßnahmen, bei denen neue Untersuchungsergebnisse aus verschiedenen Gründen nicht gewonnen werden können.

Das Ziel der Beurteilung anhand der Kriterien war eine Einteilung der Maßnahmen in die vier Kategorien:

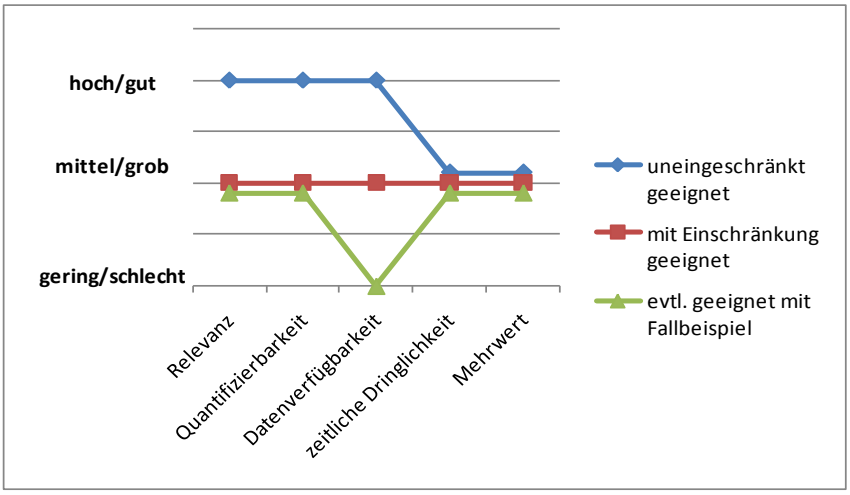
- Maßnahme ist uneingeschränkt für Vertiefung geeignet,
- Maßnahme ist mit Einschränkung für Vertiefung geeignet,
- Maßnahme ist evtl. für Vertiefung anhand von Fallbeispielen geeignet,
- Maßnahme ist nicht für Vertiefung geeignet.

Für die weitere Untersuchung eignen sich Maßnahmen, die folgende Mindestausprägungen der Kriterien erfüllen:

- eine mittlere Relevanz,
- grobe Quantifizierbarkeit,
- gute Datenverfügbarkeit,
- mittlere zeitliche Dringlichkeit
- und ein mittlerer Mehrwert gegenüber vorliegenden Untersuchungen.

Die folgende Grafik verknüpft die Ausprägungen der einzelnen Auswahlkriterien mit den Mindestanforderungen der Kategorien.

**Abbildung 2: Mindestanforderungen für Auswahlkategorien**




In der ersten Gruppe „uneingeschränkt für Vertiefung geeignet“ werden Maßnahmen zusammengefasst, die gut quantifizierbar sind und daneben eine hohe Relevanz aufweisen. Darüber hinaus müssen eine gute Datenverfügbarkeit, eine wenigstens mittlere zeitliche Dringlichkeit und ein gewisser Mehrwert gegeben sein. Maßnahmen fallen unter „mit Einschränkung zur Vertiefung geeignet“, wenn sie zumindest grob quantifizierbar sind und wenigstens eine mittlere Relevanz aufweisen. Ebenfalls muss eine zeitliche Dringlichkeit vorhanden sein, ein gewisser Mehrwert und mindestens eine mittlere Datenverfügbarkeit.

Die Rubrik „evtl. für Vertiefung anhand von Fallbeispielen geeignet“ umfasst Maßnahmen, die mindestens grob quantifizierbar und eine mittlere Relevanz aufzeigen müssen. Zusätzlich

ist aber hier nur eine Betrachtung anhand von regionalen Fallstudien möglich. Eine Aggregation der Fallstudien auf Bundesebene wird bei diesen Maßnahmen im weiteren Verlauf der Untersuchung geprüft. Alle weiteren Maßnahmen werden in die Kategorie „nicht zur Vertiefung geeignet“ eingeordnet.

## 2.1.2 Übersicht der untersuchten Anpassungsmaßnahmen

### Ausgewählte Anpassungsmaßnahmen

Aufbauend auf der Analyse anhand der Auswahlkriterien wurden 25 Anpassungsmaßnahmen für die weitere Untersuchung herausgefiltert.

**Tabelle 1: Ausgewählte Anpassungsmaßnahmen**

| Handlungsfeld | Ausgewählte Maßnahmen | Bewertung |
|---|---|---|
| Verkehr | Neue Straßenbeläge/Fahrbahndecken | uneingeschränkt geeignet |
| | Anpassung der Schieneninfrastruktur an stärkere Temperaturschwankungen und Hitze | uneingeschränkt geeignet |
| | Wetterdienstleistungen in der Transportbranche | uneingeschränkt geeignet |
| Raumplanung | Freihaltung von Frischluftschneisen als Instrument der Raumplanung | evtl. geeignet mit Fallbeispiel |
| | Begrünung von Dächern | uneingeschränkt geeignet |
| Finanzen | Bereitstellung neuer Versicherungsprodukte bzw. Integration neuer Risiken | uneingeschränkt geeignet |
| | Kooperationslösung Staat und Versicherungswirtschaft | uneingeschränkt geeignet |
| Wasserwirtschaft | Küstenschutz durch Deicherhöhung und Sandvorspülung | uneingeschränkt geeignet |
| | Vermeidung von Abwassereinleitungen in Gewässer durch zusätzliche Regenüberlaufbecken | uneingeschränkt geeignet |
| Bauwesen | Bauliche Veränderungen zum Schutz vor Stürmen – Starkregen und Wind | uneingeschränkt geeignet |
| | Bauliche Veränderungen zum Schutz vor verstärkter Sonneneinstrahlung/ höheren Temperaturen im Wohnungsbau | mit Einschränkung geeignet |
| Industrie+Gewerbe | Vermeidung von hitzebedingten Produktivitätseinbußen durch Klimatisierung | mit Einschränkung geeignet |
| | Information über Auswirkungen des Klimawandels und Anpassungsmaßnahmen | mit Einschränkung geeignet |
| Menschliche Gesundheit | Einrichtung von Warnsystemen für Hitze | uneingeschränkt geeignet |
| | Kühlung von Krankenhäusern | mit Einschränkung geeignet |
| Boden | Bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden | uneingeschränkt geeignet |
| Biologische Vielfalt | Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung | mit Einschränkung geeignet |
| Landwirtschaft | Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen | mit Einschränkung geeignet |
| | Einsatz von angepassten Pflanzensorten (tiefwurzelnde, hitzeresistente Sorten) | mit Einschränkung geeignet |
| Energie | Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwettereignisse | mit Einschränkung geeignet |

| | | |
|---|---|---|
| | Kühlung von thermischen Kraftwerken | mit Einschränkung geeignet |
| Tourismus | Diversifikation der Angebote im Tourismus zu Sommer- bzw. Alljahrestourismus (Fallbeispiel/Pilotregion) | evtl. geeignet mit Fallbeispiel |
| | Erhaltung der derzeitigen Tourismusangebote über Präparierung der Pisten | evtl. geeignet mit Fallbeispiel |
| Bevölkerungsschutz | Erarbeitung/Überarbeitung von Katastrophenschutzplänen (inkl. Notfall- und Evakuierungsplänen) | mit Einschränkung geeignet |
| | Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen) | evtl. geeignet mit Fallbeispiel |

Da nur wenige Maßnahmen in die Rubrik „uneingeschränkt geeignet“ fallen, wurden ebenfalls Maßnahmen aus den Kategorien „mit Einschränkung geeignet“ und „evtl. geeignet anhand von Fallstudien“ weiter untersucht. In mehreren Handlungsfeldern wurden aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Handlungsfelds keine Maßnahmen mit „uneingeschränkt geeignet“ bewertet, dies liegt zum größten Teil an der Quantifizierbarkeit bzw. der Datenlage. Darüber hinaus ist in einigen Handlungsfeldern aufgrund der räumlichen Differenzierung und der dadurch begrenzten Möglichkeit der Aggregation momentan nur eine Betrachtung anhand von Fallstudien möglich, z.B. im Bereich Tourismus.

## Vertiefungsthemen

Auf Grundlage der vorangegangenen Literaturrecherche und der Arbeiten zu den 25 ausgewählten Anpassungsmaßnahmen wurden drei weitere Anpassungsmaßnahmen ausgewählt, die vertieft untersucht werden.

Als Vertiefungsthemen wurde jeweils eine Maßnahme aus den Handlungsfeldern Biodiversität, Wasserwirtschaft und Raumplanung betrachtet. Diese Maßnahmen zeichnen sich durch ihre lange Implementationsdauer, einer Lücke zwischen Umsetzung und Wirkung und damit ihrer besonderen Dringlichkeit aus. Neben der Dringlichkeit bieten die Vertiefungsthemen einen deutlichen Mehrwert gegenüber vorhandenen Analysen in der Literatur und zeichnen sich durch innovative Ansätze aus, z.B. keine End-of-Pipe-Maßnahmen. Weiterhin beeinflussen die Maßnahmen mehrere Handlungsfelder und bieten das Potential für integrative Betrachtungen zw. verschiedenen Handlungsfeldern. Darüber hinaus steht für diese Maßnahmen bisher eine eingeschränkte Datenbasis zur Verfügung, die durch die Analysen verbreitert werden soll.

Detailuntersuchungen zu Kosten und Nutzen von Klimaanpassungsmaßnahmen werden für diese Vertiefungsthemen vorgenommen. Auf diese Weise wird die Informationsbasis für Kosten-Nutzen-Abschätzungen erweitert und im Rahmen der Möglichkeiten sollen Datenlücken geschlossen werden.

- Biodiversität: Die vertiefte Betrachtung bezieht sich auf die Renaturierung von Auenlandschaften. Vitale Auenlandschaften bieten eine der artenreichsten Vegetation und sind intakte Ökosysteme, die gut mit regelmäßigen Überflutungen umgehen können. Gerade bei häufigeren und intensiveren Starkregenereignissen können nur intakte und angepasste flussnahe Ökosysteme ihre biologische Vielfalt erhalten. Die Betrachtung zeigt starke Bezüge zum Hochwasserschutz. Methodisch setzt die Analyse bei der ökonomischen Bewertung von Ökosystemleistungen an.
- Abwasseraufbereitung: Der Klimawandel hat vor allem in den Sommermonaten weniger Niederschläge zur Folge, so dass die Wasserführung der Gewässer sinkt.

Das bedeutet, dass bei der Einleitung der gleichen Menge geklärten Siedlungsabwassers bei gleichbleibenden Verschmutzungsgrenzwerten die Wasserqualität sinkt – mit entsprechenden Folgen für die Umwelt und die Gewinnung von Trinkwasser, das größtenteils aus aufbereitetem Oberflächenwasser bzw. Uferfiltrat stammt. Um dieser Qualitätsverschlechterung entgegen zu wirken, müssten die Grenzwerte entsprechend gesenkt werden. Die Technik ist vorhanden, ihr Einsatz würde die Abwasseraufbereitung aber verteuern. Diese Maßnahme weist eine hohe Relevanz auf, da sie sowohl die Gesundheit der Menschen als auch eine kritische Infrastruktur betrifft.

- Raumplanung: Die Vertiefung bezieht sich auf die Maßnahmen der vorsorgenden Raumplanung beim Schutz vor Hochwasser. Die vorsorgende Raumplanung kann eine effiziente Alternative zu technischen Hochwasserschutz-Maßnahmen darstellen. Der Vergleich mit Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes ergibt ein konkretes Beispiel für die Kosten-Nutzen Betrachtung und die Priorisierung.

## 2.2 Kriterienset zur Bewertung der Anpassungsmaßnahmen

Die vertiefende Bewertung nimmt methodische Aspekte auf, die sich im Zuge der Literaturstudie zur ökonomischen Bewertung von Anpassungsmaßnahmen als vordringlich erwiesen haben. Im Einzelnen betrifft dies etwa die inhaltliche, zeitliche und räumliche Abgrenzung der Maßnahme, ihren Integrationsgrad, und die Rolle der öffentlichen Hand.

In der Literaturstudie hat sich gezeigt, dass die vorhandenen Informationen zu den Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen in sehr heterogener Form vorliegen. Daher erfolgt die Bewertung der ausgewählten Maßnahmen auf drei Ebenen:

1. Grundinformationen zu den Maßnahmen: Diese Informationen liegen für alle Maßnahmen vor und können daher entlang eines einheitlichen Kriteriensets beschrieben werden.
2. Kosten-/Nutzenerfassung: Die Kosten-Nutzen-Bewertung wird zunächst für jede Maßnahme einzeln erstellt und dokumentiert. Auf dieser Grundlage werden dann in einem zweiten Schritt Kriterien festgelegt, mittels derer die Kosten- und Nutzenaspekte in vergleichender Form dargestellt werden sollen (z.B. in Form quantitativer Kosten-Nutzen Verhältnisse, quantitative Einschätzung (ordinal), o.ä.).
3. Bewertung: Maßnahmen werden anhand einheitlicher Kriterien bewertet. Auf dieser Ebene werden auch die Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen dokumentiert, die für die weiteren Arbeiten im Aktionsplan Anpassung von Bedeutung sind.

Für die Ebenen 1 und 3 wurde eine Matrix mit beschreibenden und bewertenden Kriterien erstellt. Für die Bearbeitung wurden – wo möglich – einheitliche Ausprägungen für die Kriterien vorgeschlagen, um einen direkten Vergleich der Maßnahmen sowie eine Priorisierung zu ermöglichen. Um die Vergleichbarkeit zu erreichen, treten zwischen den verschiedenen Maßnahmen vor allem qualitative Ausprägungen auf. Dieses Kriterienset wird für die 25 ausgewählten Anpassungsmaßnahmen als auch die Vertiefungsthemen genutzt. Im folgenden Abschnitt werden die Kriterien kurz vorgestellt.

### 2.2.1 Grundinformation je Maßnahme

Die Kriterien auf dieser Ebene dienen zur Beschreibung der Maßnahmen.

Als **Basisinformation** wird angegeben, zu welchem **Handlungsfeld der DAS** die Maßnahme beiträgt. Zudem werden die Maßnahmen nach ihrer **Art** unterschieden:

- Prozessbezogen: Planungs- und Entscheidungsprozesse, die zu einem erhöhten Anpassungspotential beitragen (z.B. langfristige Strategien in der Raumplanung).
- Subjektbezogen: Informationen für vom Klimawandel betroffene Akteure (wie können Akteure ihre Handlungen möglichst gut an die veränderten Klimabedingungen anpassen?)
- Objektbezogen: Technische Maßnahmen und Infrastrukturen zum Schutz vor Klimawirkungen.

Ein weiterer Kriterienbereich stellt dar, welche **Bedeutung die Maßnahme für die öffentliche Hand** hat und auf welcher Ebene sie anzusiedeln ist:

- Akteur: Welche Akteure setzen die Maßnahme um? Muss die Maßnahme von der öffentlichen Hand durchgeführt werden, da sie von privaten Akteuren nicht bzw. nicht in ausreichendem Maß oder nicht schnell genug umgesetzt wird (z.B. bei öffentlichen Gütern, zu hoher Unsicherheit, etc.)? Braucht die Maßnahme Anschub von Seiten der öffentlichen Hand, um (rasch genug) umgesetzt zu werden?
- Finanzierung: Zu welchem Teil wird die Maßnahme durch die öffentliche Hand finanziert?
- Politische Ebene: Für Maßnahmen im Bereich der öffentlichen Hand oder an der Schnittstelle privat-öffentlich: Welche föderale Ebene ist für den Vollzug bzw. das Anstoßen der Maßnahme über Instrumente zuständig?
- Die Beschreibung umfasst zudem eine Einschätzung bezüglich des Vollzugs der Maßnahme: Bei Maßnahmen an der Schnittstelle privat/öffentlich: Welche Finanzierungs- und Anreizinstrumente kommen zur Initiierung der Maßnahme in Frage? Bestehen diese bereits oder müssen sie eingeführt werden? Sind die rechtlichen Rahmenbedingungen vorhanden oder müssen sie neu geschaffen werden?
- Gibt es zusätzlichen Vollzugsaufwand auf Seiten der öffentlichen Hand und/oder der privaten Akteure? Wird für die Umsetzung der Maßnahme eine eigene Vollzugsstelle benötigt? Sind die rechtlichen Rahmenbedingungen vorhanden oder müssen sie neu geschaffen werden?

Bei der Aufbereitung des bestehenden Wissenstandes zur ökonomischen Bewertung der Anpassung an den Klimawandel wurde deutlich, dass die **zeitliche Dimension** eine besondere Rolle bei Beschreibung und Vergleich der Maßnahmen spielt. Daher wird diese zeitliche Dimension im Kriterienset aufgenommen:

- Zeithorizont: Zeigt den Zeitpunkt, an dem die Maßnahme notwendig wird, je nach Auswirkungen des Klimawandels.
- Time-lag zwischen Initiierung und Wirkung: Zeigt, wie lange der time-lag zwischen Initiierung der Maßnahme und deren Wirksamkeit ist.

- Lebensdauer: Bei der Beschreibung der zeitlichen Dimension muss zudem die Lebensdauer der Maßnahme berücksichtigt werden (Erneuerungszyklen) bzw. deren Wirkungsdauer (bei weichen Maßnahmen).

### 2.2.2 Kosten- und Nutzenerfassung

Die Kosten und Nutzen der ausgewählten Anpassungsmaßnahmen werden zunächst auf Ebene der einzelnen Maßnahmen erfasst. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Maßnahmen der öffentlichen Hand bzw. auf Maßnahmen an der Schnittstelle privat-öffentlich. Kosten und Nutzen fallen häufig zeitlich verschoben an, so dass der zeitliche Ablauf der Kosten- und Nutzenströme und die Frage der Diskontierung zu beachten sind. Beim Nutzen wird zwischen der privatwirtschaftlichen und der gesamtwirtschaftlichen Ebene unterschieden. Die **Nutzenanalyse** erfolgt entlang der Integrationsgrade von Anpassungsmaßnahmen:

- Welche Klimaschäden lassen sich durch die Maßnahme vermeiden (z.B. eingesparte Kosten durch Überschwemmungen)?
- Wie trägt die Maßnahme zu einer klimaresilienteren Wirtschafts- und Gesellschaftsstruktur bei (Diversifizierung Energiemix, raumplanerische Vorsorge)?
- Wie trägt die Maßnahme zur Reduzierung der Transaktions- und Informationskosten bei (z.B. durch Informationssysteme)?
- Wie wirkt sich die Maßnahme auf die Stärkung der Eigenvorsorge aus (über Wissensvermittlung, Reduktion von Unsicherheiten, ‚awareness raising')?
- Wie trägt die Maßnahme zur Verteilung der Klimaschäden bei (z.B. durch Versicherungslösungen)?

Bei der Nutzenanalyse werden zudem indirekte Auswirkungen (der sogenannte Sekundärnutzen) berücksichtigt. Dieser Sekundärnutzen wird v.a. dann berücksichtigt, wenn bereits der Primärnutzen ausreichend oder knapp ausreichend für ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis ist. Denn ein Sekundärnutzen kann auch durch andere Investitionstätigkeiten generiert werden:

- Positive Auswirkungen der Maßnahme auf Wertschöpfung und Beschäftigung (z.B. innovative Technologien).
- Synergien/Nutzen in anderen Politikbereichen, z.B. Energiesicherheit, Beitrag zu anderen umweltpolitischen Zielen, etc.

Die **Kostenbetrachtung** orientiert sich an einer Investitionsrechnung. Dabei werden die betriebswirtschaftlichen Kosten der Maßnahme quantitativ und qualitativ geschätzt: einmaliger Investitionsaufwand, laufende Kosten und Transaktionskosten. Zudem werden weitere Kostenkomponenten berücksichtigt:

- Weitere wirtschaftlich relevante Folgen einer Maßnahme, z.B. negative Auswirkungen auf Wettbewerbsfähigkeit oder Innovation.
- Quantitative und qualitative Einschätzung zu externen Kosten der Maßnahme, z.B. negative Auswirkungen auf das Grundwasservorkommen durch Bewässerung in der Landwirtschaft, reduziertes Wohlbefinden in klimatisierten Räumen, reduzierte Weitsicht durch Schutzbauten, etc.

Die Kosten- und Nutzenbetrachtung soll in einem zweiten Schritt vereinheitlicht werden, um einige Schlüsselkriterien vergleichen zu können. Wichtig ist dabei, dass bei der Gegenüberstellung entweder die Gesamtkosten und der Gesamtnutzen (als Nettogegenwartswert für die gesamte Lebens- und Wirkungsdauer einer Maßnahme), oder die daraus abgeleiteten durchschnittlichen Kosten pro Jahr in der Lebens- und Wirkungsdauer der Maßnahme (Annuitäten) verglichen werden.

Für die Bewertung der Kosten und Nutzen ist zudem eine **Angabe zur Verlässlichkeit** der Aussagen notwendig (Sicherheit/Unsicherheit).

### 2.2.3 Beurteilungskriterien

Auf Basis der beschreibenden Kriterien sowie der Kosten- und Nutzenbetrachtung werden die ausgewählten Maßnahmen bewertet, um die Maßnahmen untereinander vergleichen zu können. Dies erlaubt ggf. auch eine Priorisierung der Maßnahmen nach Kosten- und Nutzenaspekten oder anderen Kriterien.

Bei der Beurteilung der Maßnahmen ist das Kriterium der **Relevanz** entscheidend. Eine isolierte Betrachtung der Kosten und Nutzen ohne Berücksichtigung der Relevanz könnte zu verzerrten Ergebnissen führen. Die Relevanz wird anhand der folgenden Leitfragen beurteilt:

- Hinweise für eine übergeordnete Bedeutung der Maßnahme (need-to-have vs. nice-to-have): Liegt der Maßnahme ein absoluter Schutzgedanke2 (z.B. menschliche Gesundheit, Biodiversität) zugrunde? Dient die Maßnahme zum Schutz kritischer Infrastrukturen im Sinne der Sicherung der Systemstabilität?
- Falls ein „absoluter Schutzgedanke“ vorliegt: auf welcher rechtlichen Basis beruht dieser Schutzanspruch?

Die Beurteilung umfasst zudem eine **erste Einschätzung zum Kosten-Nutzen Verhältnis**. Diese Einschätzung wird ergänzt durch die vertiefenden Analysen auf der Ebene Kosten-Nutzen Erfassung.

- Effektivität: Welcher Teil der Klimaschäden in diesem Bereich können durch die Maßnahme vermieden werden? Hier erfolgt die Argumentation entlang der Integrationsgrade, daher vom Beitrag der Maßnahme im Bereich Awareness raising bis hin zur direkten Vermeidung von Klimaschäden.
- Mitnahmeeffekte: Bei von der öffentlichen Hand finanzierten Maßnahmen stellt sich die Frage, ob die Maßnahme wirklich additiv ist, oder ob die privaten Akteure sie auch selbständig durchgeführt hätten.
- Dynamischer Anreiz: Hat die Maßnahme eine dynamische Anreizfunktion in Richtung einer besseren Anpassungsfähigkeit oder handelt es sich um einen Einmaleffekt?
- Reichweite der Maßnahme: Auf welcher Ebene sind die Nutzen der Maßnahme anzusiedeln (lokal, regional, überregional, national)?

---

[2] Auch bei absoluten Schutzgedanken (wie Schutz der menschlichen Gesundheit) kann eine KNA zum Einsatz kommen, wenn die Nutzen einigermassen gestützt quantifiziert werden können. Dies ermöglicht es z.B. bei gegebenen knappen finanziellen Mitteln allenfalls zwischen verschiedenen Massnahmen mit absolutem Schutzgedanken zu priorisieren.

Die Akzeptanz stellt ein wichtiges Kriterium für die Realisierungschancen der Maßnahmen dar. Dabei sind zwei verschiedene Aspekte der Akzeptanz zu unterscheiden:

- Gesellschaftliche Akzeptanz: Wie wird die Maßnahme von den betroffenen gesellschaftlichen Kreisen akzeptiert?
- Politische Akzeptanz: Welche Unterstützung kann diese Maßnahme auf politischer Ebene erreichen? Dabei ist zu berücksichtigen, dass die politische Akzeptanz oft eng mit der gesellschaftlichen Akzeptanz verknüpft ist.

Das Kriterium **Wechselwirkungen** erfasst, inwiefern sich Maßnahmen gegenseitig positiv oder negativ bedingen oder beeinflussen. Hierbei können die Wirkungen zwischen den Anpassungsmaßnahmen über eine Matrix bewertet und aggregiert werden. Durch die Berücksichtigung solcher Synergien und Querbezüge aber auch von Überlappungen und Konflikten können eventuell „Bündel“ von Maßnahmen identifiziert werden, die einander bedingen oder auf verschiedene Handlungsfelder wirken und im weiteren Verlauf der Untersuchungen gemeinsam betrachtet werden können.

Als weiteres zentrales Kriterium ist die Flexibilität der Maßnahmen zu berücksichtigen. Dabei sind zwei unterschiedliche Dimensionen der Flexibilität zu berücksichtigen:

- Regret/low-regret/no-regret: zeigt, ob der Erfolg einer Maßnahme an die Voraussetzungen eines bestimmten Klima-Szenarios geknüpft ist oder ob die Maßnahme auch aus anderen Gründen vorteilhaft wäre (z.B. im Sinne einer nachhaltigeren Entwicklung).
- Szenario-Variabilität: zeigt, ob eine Maßnahme für alle Klimaszenarien anwendbar ist, oder ob sie bei einem anderen Klima-Szenario (v.a. worst case) weniger effektiv ist. Dabei ist zu unterscheiden, ob Maßnahmen dann gar nicht mehr wirken (z.B. Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft, die ab bestimmtem Temperaturanstieg und Trockenheit keinen Nutzen mehr bringen) und Maßnahmen, die in ihrem bisherigen Umfang nicht mehr effektiv sind, aber erweitert werden können (z.B. Erhöhung von Deichen).

**Abbildung 3: Überblick des Kriteriensets**

| Basisinformationen | Kosten-/Nutzen-Erfassung | Beurteilung |
|---|---|---|
| - Handlungsfeld<br>- Art der Maßnahme<br>- Bedeutung der Maßnahme für die öffentliche Hand<br>  ○ umsetzende Akteure<br>  ○ öffentliche Finanzierung<br>  ○ Ebene der Umsetzung<br>- Vollzug<br>  ○ Vollzugsaufwand<br>  ○ Finanzierungs-/ Anreizinstrumente<br>- Zeitliche Dimension<br>  ○ Zeithorizont<br>  ○ Time-lag<br>  ○ Lebensdauer | - Kosten<br>  ○ betriebswirtschaftliche Kosten<br>  ○ weitere wirtschaftl. Folgen<br>  ○ externe Kosten<br>- Nutzen<br>  ○ Primärnutzen<br>  ○ Sekundärnutzen<br>- Verlässlichkeit der Aussagen | - Relevanz<br>- Effektivität<br>- Mitnahmeeffekte<br>- Dynamischer Anreiz<br>- Reichweite<br>- Akzeptanz<br>  ○ gesellschaftliche Akzeptanz<br>  ○ politische Akzeptanz<br>- Wechselwirkungen<br>- Flexibilität<br>  ○ Regret/no-regret<br>  ○ Szenario-Variabilität |

# 3 Kosten-Nutzen-Bewertung der ausgewählten Anpassungsmaßnahmen

## 3.1 Handlungsfeld Verkehr

### 3.1.1 Anpassungsmaßnahme „Neue Straßenbeläge/Fahrbahndecken“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Die Straßeninfrastrukturen sind über mehrere Einflusskanäle vom Klimawandel betroffen. Ein wichtiger Aspekt ist die zunehmende Variabilität der Temperaturen, insbesondere mit dem Anstieg der durchschnittlichen Temperatur und der Zunahme der Hitzetage im Sommer. Vor allem bei den heute verwendeten Fahrbahndecken können diese Klimawirkungen zu unterschiedlichen Folgen führen (BAST 2010):

- Veränderung des Materialverhaltens unter Belastung (Materialanpassungen nicht berücksichtigt),
- Veränderung des Spannungsniveaus im Straßenaufbau (Ermüdung),
- Veränderung des Langzeitverhaltens von Standardbauweisen infolge der Zunahme der mittleren Temperatur und der Anzahl der heißen Tage, mit: Zunahme der Spurrinnenbildung (plastische Verformungen), Erhöhung der Anzahl der „Blow up’s“ bei Betonbefestigungen (Hitzeaufbrüche), Überschreiten der maximal zulässigen horizontalen Fugenbewegungen bei Betonbefestigungen,
- Überbeanspruchung der Endfelder an Übergängen (Beton/Asphalt).

**Abbildung 4: Beschädigte Betonplatten auf der A29 im Sommer 2010[3]**

All diese Wirkungen führen zu Beeinträchtigungen der Straßeninfrastruktur. Es entstehen zusätzliche Gefahren, Verkehrsbehinderungen, Straßensperrungen sowie ein Anstieg der Unterhaltsarbeiten.

## Kosten- und Nutzenerfassung

Bislang liegen keine Kosten- und Nutzenschätzungen zu dieser Maßnahme vor. Die BAST wird sich in einem Forschungsprojekt ab 2011 mit dieser Maßnahme detailliert auseinandersetzen, konkrete Ergebnisse werden jedoch erst für 2012/13 erwartet. Aktuell bestehen bezüglich der Kosten-/Nutzenbetrachtung die folgenden Unsicherheitsebenen:

- Auswirkungen Klimawandel: Die Vulnerabilität des deutschen Straßennetzes wird noch detailliert untersucht. Neben regionalen Klimadaten sind dafür sehr spezifische Angaben über die Charakteristika der Straßenabschnitte notwendig: Topographie, Umfeld (z.B. Wälder, versiegelte Flächen), Beanspruchung.
- Reaktion der Fahrbahndecken auf Klimawandel: Es ist nicht klar, wie die unterschiedlichen Fahrbahndecken auf dem deutschen Straßennetz auf steigende Temperaturen reagieren. Bisher wurden v.a. mit Betonplatten und -befestigungen aus den 80er Jahren Erfahrungen gemacht (siehe Schäden auf der A29 im Sommer 2010). Die Reaktion der anderen Straßenbeläge auf steigende Temperaturen soll im Rahmen von Tests untersucht werden. Die Wirkungen hängen auch von weiteren Annahmen ab, z.B. zum Anstieg des Schwerverkehrs und zum Einsatz schwerer Fahrzeuge (Gigaliner).
- Mehrkosten der neuen Straßenbeläge: Da die neuen Straßenbeläge noch im Entwicklungsstadium sind, können die Mehrkosten bisher nur grob auf Basis bestehender Erkenntnisse abgeleitet werden.

---

[3] Bildquellen: Hamburger Abendblatt vom 14. Juli 2010: http://www.abendblatt.de/hamburg/polizeimeldungen/article1567756/Vollsperrung-die-Hitze-macht-Autobahn-29-kaputt.html; Omnibus-Revue: http://www.omnibusrevue.de/sommerhitze-hebt-betonplatten-autobahn-29-gesperrt-954802.html

- Risikobewertung: Dem Ersatz von Straßenbelägen liegt auch eine eigene Risikobewertung zugrunde. Es bleibt zu diskutieren, ob die Straßendecken im Zuge der sowieso anstehenden Sanierungen ersetzt werden, oder ob einzelne stark gefährdete Abschnitte zur Vorsorge vorzeitig ersetzt werden.

Für all diese Unsicherheitsebenen müssen in der folgenden Analyse der Kosten und Nutzen entsprechende Annahmen getroffen werden. Daher ist die Kosten-Nutzenschätzung als erste Annäherung zu verstehen, die in den weiteren Arbeiten zur deutschen Anpassungsstrategie zu vertiefen ist.

### Kostenschätzung

Die groben Kostenschätzungen werden beispielhaft für das Netz der Bundesautobahnen durchgeführt und beziehen sich auf den Zeitraum 2040-2070 (ca. Lebensdauer des bestehenden Autobahnnetzes). Es ist nicht davon auszugehen, dass bis Mitte des Jahrhunderts alle Autobahnen durch steigende Temperaturen belastet sind. Um die Kosten nicht zu überschätzen, wurden für die Analyse nur die Autobahnen in denjenigen Bundesländern berücksichtigt, in denen die Temperaturen und Hitzetage überdurchschnittlich ansteigen:[4] Gemäß regionalem Klimaatlas sind dies die fünf Bundesländer Baden Württemberg, Bayern, Hessen sowie Rheinland-Pfalz und das Saarland (im Klimaatlas gruppiert).

**Tabelle 2: Erwarteter Temperaturanstieg und Autobahnkilometer**

| | Temperaturanstieg Sommer bis 2041-2070 (in Grad C) | | Anstieg der heißen Tage bis 2041-2070 (Anzahl Tage) | | Autobahn-Kilometer |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mittlerer Wert | Max-Wert | Mittlerer-Wert | Max-Wert | km |
| Ganz Deutschland | 2 | 2,2 | 6,4 | 8,6 | 12800 |
| Baden-Württemberg | 2,2 | 2,7 | 11,2 | 16,1 | 1020 |
| Bayern | 2,2 | 2,5 | 7,7 | 10,3 | 2503 |
| Rheinland-Pfalz, Saarland | 2,1 | 2,6 | 9,8 | 15,9 | 1106 |
| Hessen | 2,1 | 2,5 | 7,5 | 12,1 | 2000 |
| **Gesamt betroffene Bundesländer** | | | | | **6629** |

*Quelle: Regionaler Klimaatlas Deutschland, unterschiedliche Quellen zu Autobahn-Kilometern.*

Auf Basis der Datenquellen der relevanten Landesbehörden (z.B. Baubehörden) wurden die heutigen Längen der Autobahnen in diesen fünf Bundesländern ermittelt. Insgesamt sind

[4] Die Klimadaten im regionalen Klimaatlas liegen bisher auf Ebene der Bundesländer vor. Eine weitere Auflösung der Daten innerhalb der Länder liegt nur vereinzelt vor. Daher wurde dieser Ansatz für die Identifizierung der betroffenen Autobahnen gewählt. Für eine weitere Vertiefung wäre es möglich, alle Bundesländer zu betrachten und dann jeweils den Anteil der betroffenen Autobahnen zu identifizieren.

nach dieser Herleitung also 6.600 km bzw. 52 % des deutschen Autobahnnetzes vom Klimawandel betroffen.

Bezüglich der Mehrkosten liegen aktuell nur Angaben für bereits bekannte verbesserte Asphaltmischungen vor. Als Referenz werden die polymer-modifizierten Verfahren verwendet, die aktuell an der Uni Wuppertal entwickelt werden. Die Mehrkosten für diese verbesserte Asphaltmischung liegen bei ca. 5-15 % gegenüber heutigem Standard-Asphalt.[5]

Angaben zu den heutigen Sanierungskosten des Oberbaus können aus der Wegekostenrechnung für die Bundesfernstraßen in Deutschland (IWW & Progtrans 2007) entnommen werden. Danach liegen die Kosten für die Erneuerung der Deckschicht (also der Asphaltdecke) bei einer sechsspurigen Straße bei 0,3 bis 0,4 Mio € pro Kilometer. Wir verwenden für unsere Berechnungen einen Mittelwert von 0,35 Mio. € pro Kilometer. Unter Berücksichtigung der Mehrkosten von 5-15% ergeben sich somit die folgenden Mehrkosten:

**Tabelle 3: Mehrkosten durch Anpassung an den Klimawandel**

| | Heutiger Asphalt | Neuer Asphalt min | Neuer Asphalt max |
|---|---|---|---|
| Sanierung alle 10 Jahre (Mio. €) | 2300 | 2400 | 2700 |
| Kosten pro Jahr (Mio. €) | 230 | 240 | 270 |
| **Mehrkosten pro Jahr (Mio. €)** | | **10** | **40** |

Die Mehrkosten für die 6.600 km liegen somit in einer Bandbreite von 10 bis 40 Mio. € pro Jahr.

### Bewertung der Nutzen

Nutzenseitig ist für die Maßnahme der hitzeresistenten Straßenbeläge eine ganze Reihe von Aspekten zu berücksichtigen:

- Eingesparte Zeitverluste, da temporäre Straßensperrungen und damit zusammenhängende Umwegfahrten und Umweltkosten vermieden werden können.
- Eingesparte Unfallkosten, da zusätzliche Risiken durch Verformungen der Fahrbahndecken reduziert werden.
- Eingesparte Wartungs- und Unterhaltskosten
- Eingesparte Verschleißkosten an den Fahrzeugen durch schlechte Fahrbahndecken.

Für die erste grobe Schätzung wurden die ersten drei Aspekte quantifiziert.

Für die **Zeitverluste** mussten wir einige Annahmen treffen, die in den weiteren Arbeiten zu verifizieren sind. Da aktuell noch keine detaillierten Informationen zu den erwarteten Hitzeschäden vorliegen, beruhen die Annahmen auf eigenen Einschätzungen:

[5] Persönlicher Kontakt mit Prof. Beckedahl, Uni Wuppertal.

- Annahme zu Behinderungen: An jedem zweiten Hitzetag ergibt sich eine Störung pro 500 km Autobahn.
- Dauer der Sperrung: Pro Vorfall wird die Autobahn durchschnittlich für einen Tag gesperrt.
- Zusätzlicher Zeitaufwand: Die Fahrzeuge müssen durchschnittlich einen Umweg von 30 min. in Kauf nehmen. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass es sich nur um PKW-Fahrten handelt.

**Tabelle 4: Erwartete Störungen der Straßeninfrastruktur durch Hitze**

| | Anzahl Hitzetage | | | Anzahl Störungen | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mittlerer Wert | Max | km Autobahn | Mittlerer Wert | Max |
| Baden-Württemberg | 6,4 | 8,6 | 1020 | 7 | 9 |
| Bayern | 11,2 | 16,1 | 2503 | 28 | 40 |
| Rheinland-Pfalz, Saarland | 7,7 | 10,3 | 1106 | 9 | 11 |
| Hessen | 9,8 | 15,9 | 2000 | 20 | 32 |
| **Gesamt pro Jahr** | | | | **63** | **92** |

Die Anzahl der Störungen durch hitzebedingte Verformungen liegt insgesamt also zwischen 60 und 90 pro Jahr.

Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke auf den deutschen Autobahnen von 48.800 Fahrzeugen und den Umweg von 30 min ergeben sich die folgenden Zeitkosten:[6]

**Tabelle 5: Zeitkosten**

| | Mittlerer Wert | Max Wert |
|---|---|---|
| Anzahl Störungen pro Jahr | 63 | 92 |
| Durchschnittl. Verkehrsstärke auf Autobahnen (pro h) | 48.800 | 48.800 |
| Zeitverlust in h | 0,5 | 0,5 |
| Zeitkosten in € pro Stunde | 6 | 6 |
| **Zeitkosten gesamt (Mio. €)** | **9** | **14** |

[6] Für die Zeitkosten im Personenverkehr wird gemäß Empfehlungen zur Wirtschaftlichkeitsrechnung Straßen (EWS) ein durchschnittlicher Zeitkostenansatz (private Reisen/geschäftliche Reisen) von knapp 6 Euro/Stunde verwendet.

Für die Unfallkosten wird hier vorläufig angenommen, dass sich an jedem zweiten Hitzetag ein zusätzlicher Unfall pro 500 km Autobahn ergibt. Die Unfälle führen jeweils zu einer schweren Verletzung. Die Kosten pro schwerer Verletzung betragen 229.400 €.[7]

### Tabelle 6: Erwartete zusätzliche Unfälle durch Hitze

| | Anzahl Hitzetage | | | Anzahl Unfälle | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mittlerer Wert | Max | km Autobahn | Mittlerer Wert | Max |
| Baden-Württemberg | 6,4 | 8,6 | 1020 | 7 | 9 |
| Bayern | 11,2 | 16,1 | 2503 | 28 | 40 |
| Rheinland-Pfalz, Saarland | 7,7 | 10,3 | 1106 | 9 | 11 |
| Hessen | 9,8 | 15,9 | 2000 | 20 | 32 |
| **Gesamt Unfälle pro Jahr** | | | | **63** | **92** |
| **Unfallkosten bei "schweren Verletzungen" in Mio. €** | | | | **14** | **21** |

Für die vermiedenen Reparaturarbeiten wird auf Erfahrungswerte aus dem Bereich der Frostschäden zurückgegriffen. Nach dem kalten Winter 2010/2011 hat das Land Hessen einen zusätzlichen Finanztopf für die Beseitigung von Winterschäden in Höhe von 100 Mio. Euro bereitgestellt.[8] Allein für den Bereich der Landesstraßen mit einer Länge von 75 km sind darin 15 Mio. € eingestellt. Pro Kilometer entspricht dies Reparaturkosten von 200.000 €. Da Schlaglöcher durch Frost deutlich häufiger auftreten als hitzebedingte Verformungen und die Qualität der Autobahnen deutlich über der Qualität des untergeordneten Straßennetzes liegt, gehen wir davon aus, dass die zusätzlichen Reparaturkosten durch Hitze bei ca. 1-3% der Kosten durch Frost liegen. Pro Kilometer würden sich ohne die Anpassungsmaßnahme daher zusätzliche Reparaturkosten in Höhe von 2.000 € bis 6.000 € ergeben. Für das betroffenen Autobahnnetz ergeben sich auf dieser Basis eingesparte Reparaturkosten in Höhe von 13 bis 40 Mio. €.

### Tabelle 7: Eingesparte Reparaturkosten durch hitzebedingte Verformungen

| | |
|---|---|
| Zusätzliche Reparaturkosten durch Frostschäden (in €/km) | 200.000 |
| Zusätzl. Reparaturkosten durch Hitze (1% der Kosten Frost) (€/km) | 2.000 |
| Zusätzl. Reparaturkosten durch Hitze (3% der Kosten Frost) (€/km) | 6.000 |
| | |
| Zusätzl. Kosten betroffenes Autobahnnetz (min, in Mio. €) | 13,2 |
| Zusätzl. Kosten betroffenes Autobahnnetz (max, in Mio. €) | 39,6 |

[7] Quelle: EU Handbuch zu externen Kosten im Verkehr, aus Projekt HEATCO.

[8] Gesetzentwurf zur Behebung von Winterschäden an Straßen für das Land Hessen.

**Vergleich Kosten und Nutzen**

Die folgende Tabelle stellt die Kosten und Nutzen im Vergleich dar. Bei dieser sehr groben Nutzenbetrachtung mit Fokus auf Zeit- und Unfallkosten sowie die eingesparten Reparaturkosten liegen die Kosten der Maßnahme fast in der gesamten Betrachtungsbandbreite über den Nutzen. Nur falls die minimale Nutzenschätzung mit der oberen Bandbreite der Kosten kombiniert wird, ergibt sich ein negatives Nutzen-Kosten Verhältnis. Dabei ist zu jedoch zu berücksichtigen, dass weitere Nutzenkomponenten nicht quantifiziert wurden und insbesondere nicht berücksichtigt wurde, dass die Maßnahme auch ohne Klimawandel zu einer längeren Lebensdauer der Fahrbahn führt. Daher ist das Nutzen-Kosten Verhältnis der Maßnahme insgesamt als positiv zu betrachten.

**Tabelle 8: Kosten-Nutzen-Gegenüberstellung**

| In Mio. € | Kosten | Nutzen Zeit | Nutzen Unfälle | Nutzen Reparatur | Nutzen gesamt | Nutzen-Kosten Verhältnis |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Min | 10 | 9 | 14 | 13 | 36 | Bei min. Kosten: 3,6 bis 7,5 : 1 |
| Max | 40 | 14 | 21 | 40 | 75 | Bei max. Kosten 0,9 bis 1,9 : 1 |

## Beurteilung der Maßnahme

**Beurteilung:**

- Relevanz: Die Relevanz der Maßnahme ist als mittel einzuschätzen. Es handelt sich um keine need-to-have Maßnahme im Sinne der Sicherung der Lebensgrundlagen. Die Maßnahme spielt jedoch eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung zuverlässiger Verkehrswege und hat somit für die Wirtschaft eine wichtige Bedeutung. Dies wird daran deutlich, dass Schäden an Autobahnen heute prioritär und meist zeitnah repariert werden. Falls es in einem Gebiet zu einer Kumulation von Schadensfällen kommt, kann die Versorgung der Bevölkerung mit Lebensmitteln und Gesundheitsgütern vorübergehend eingeschränkter möglich sein. In den meisten Fällen dürften Alternativrouten am Boden verfügbar sein (andere Verkehrsträger, andere Routen, etc.).
- Kosten-Nutzen Verhältnis: Bei Quantifizierung aller Nutzenelemente, insbesondere auch der Auswirkung der Maßnahme auf die Lebensdauer der Fahrbahn, ergibt sich ein positives Nutzen-Kosten Verhältnis. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Kosten eher an der unteren geschätzten Bandbreite liegen.
- Akzeptanz: Die Akzeptanz dieser Maßnahme ist sehr hoch, da die Zuverlässigkeit und Qualität des Autobahnnetzes eine hohe Bedeutung in Deutschland hat und von Seiten der Nutzer der Anspruch auf ordnungsgemäße Verkehrswege besteht.
- Wechselwirkungen: Es ergeben sich evtl. Wechselwirkungen mit anderen technischen Maßnahmen im Bereich Verkehr (z.B. dem gleichzeitigen Einbau verbesserter Drainage-Systeme zur Verhinderung von Aquaplaning). Die Schnittstellen zu anderen Handlungsfeldern scheinen eher gering.

- Flexibilität: Die Maßnahme hat Potential, als low-regret Maßnahme eingestuft zu werden. Die heutigen Erkenntnisse zu den neuen Straßenbelägen weisen darauf hin, dass diese auch ohne Klimawandel näher an die Wirtschaftlichkeitsschwelle gelangen, da sich die Lebensdauer der Fahrbahndecken verlängert.

**Zusammenfassung:**

Diese Fallstudie zeigt einige wichtige Probleme von Kosten-Nutzen-Schätzungen auf. Es wird deutlich, dass eine Vielzahl von Unsicherheitsebenen vorhanden ist, die sowohl auf der Kosten- als auch auf der Nutzenseite die Quantifizierung erschweren. In der Gesamtsicht ist das Ergebnis somit nur als erste grobe Schätzung zu verstehen, das im Zeitverlauf weiter plausibilisiert werden muss.

Viele der Annahmen können bei Bedarf noch verifiziert werden, jedoch ist immer auf einen heutigen Referenzwert der Störungshäufigkeiten und deren Folgen zurückzugreifen (z.B. könnte für Anzahl der Störungen auf Daten zur heutigen Verkehrssituation auf den Autobahnen zurückgegriffen werden). Ob sich aus diesen Referenzwerten jedoch übertragbare Aussagen ableiten lassen, ist fraglich.

Die aktuelle Schätzung bezieht sich auf das Netz der Bundesautobahnen. Die tatsächliche Betroffenheit wird aktuell von der BAST abgeschätzt, mit Hilfe von Überschneidungen von Klimadaten und Straßenkarten mit spezifischen Informationen zur Lage und Beschaffenheit der Straßen. Eine Berechnung für das gesamte deutsche Straßennetz erscheint sehr komplex und im Rahmen unseres Projekts nicht machbar.

Insbesondere auf der Nutzenseite sind zudem einige bekannte Bewertungsfragen zu nennen: so müssen z.B. Annahmen zu Zeitkosten und zu Unfallkosten getroffen werden.

### Tabelle 9: Auswertung der Maßnahme „Straßeninfrastruktur“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Schutz kritischer Infrastruktur | Die Maßnahme spielt eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung der kritischen Verkehrsinfrastruktur. Sie verfolgt jedoch keinen absoluten Schutzgedanken. |
| **Effektivität** | Hoch | Über die Verwendung neuer Asphaltmischungen kann die hitzebedingte Verformung der Fahrbahn weitgehend vermieden werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | kein | Die Finanzierung der Bundesautobahnen liegt heute im Zuständigkeitsbereich des Bundes. Die Maßnahme benötigt keine neuen Finanztransfers von der öffentlichen Hand an Private, so dass auch keine Mitnahmeeffekte entstehen. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja | Es handelt sich um einmalige Entscheidung zur Verwendung neuer Asphaltmischungen ab einem bestimmten Zeitpunkt. Diese Entscheidung setzt Anreize in die weitere Entwicklung und Kostensenkung bei den entsprechenden Materialien. |
| **Reichweite** | National | Die Maßnahme sollte auf nationaler Ebene umgesetzt werden. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Zuverlässigkeit und Qualität der Autobahnen haben einen hohen Stellenwert in Deutschland, so dass die Akzeptanz für diese Maßnahme gegeben ist. Es gibt kaum direkte Verlierer. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Die Verwendung neuer Asphaltmischungen wirkt sich auch auf die Lebensdauer der Fahrbahnen aus. Die Maßnahme kann daher als low-regret Maßnahme eingestuft werden. |
| **Szenario-Variabilität** | Nein, reduzierte Wirkung | Es ist nicht genau klar, wie die neuen Asphaltmischungen bei extremen Temperaturen oder anderen Klimawirkungen reagieren. Es ist davon auszugehen, dass die Funktionsfähigkeit der Autobahnen bei extremen Klimaszenarien trotz dieser Maßnahme eingeschränkt wird. |

### 3.1.2 Anpassungsmaßnahme „Anpassung der Schieneninfrastruktur an stärkere Temperaturschwankungen und Hitze“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Ähnlich wie bei der Straßeninfrastruktur wird der Klimawandel auch auf die deutsche Schieneninfrastruktur über mehrere Einflusskanäle wirken. Dabei soll hier insbesondere auf die Auswirkungen stärkerer Temperaturschwankungen und extrem hoher Temperaturen auf die Schieneninfrastruktur eingegangen werden. Starke Temperaturschwankungen führen zu Längsausdehnungen im Gleis und somit zu mechanischen Spannungen, die zu Verformungen führen können. Diese Verformungen stellen ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar und können im Extremfall zum Entgleisen von Zügen führen (Baker et al. 2010, Hoffmann et al. 2009).

Moderne Gleisanlagen sind bereits heute so konzipiert, dass sie Temperaturschwankungen innerhalb bestimmter Grenzen standhalten können. Bei endlos verschweißten Schienen wird dies über die Definition der „neutralen Temperatur“ bestimmt. So werden die Schienen der Deutschen Bahn AG in einem Temperaturbereich zwischen 20–26 °C verschweißt, innerhalb dessen die mechanischen Spannungen nahezu ausgeglichen sind. Die weiteren Kräfte die von der Temperaturausdehnung ausgehen, werden von der Schienenbefestigung aufgenommen und über die Schwelle in den Schotteroberbau weitergeleitet. (ThyssenKrupp, Oberbauhandbuch).

Ob die heutige Praxis im Schienenbau und in der Wartung und Kontrolle angemessen ist, um den zu erwartenden Temperaturänderungen standzuhalten, wurde für Deutschland bisher nicht im Detail analysiert. Anfragen sowohl beim Eisenbahnbundesamt und bei der DB Netze als auch bei parallel laufenden Forschungsvorhaben haben ergeben, dass hierzu noch keine konkreten Analysen vorliegen. Im Rahmen dieser Fallstudie wird daher auf detaillierte Arbeiten für das Vereinigte Königreich von Großbritannien und Nordirland (UK) zurückgegriffen (Baker et al. 2010, Dobney et al. 2010, Dobney 2010, UK Rail Safety and Standards Board 2003). Für UK wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Schieneninfrastruktur aufgrund falscher Verschweißungen und mangelnder Wartung von hitzebedingten Verformungen betroffen sein wird. Als Reaktion darauf werden die folgenden Maßnahmen aufgeführt:

- Reduzierte Geschwindigkeiten im Schienenverkehr, um erhöhte Belastungen der Schieneninfrastruktur zu vermeiden.
- Anpassung des „heat stressings“.
- Anpassung der Materialien im Schienenoberbaubau, z.B. Stahltypen mit höherer Standfestigkeit bei Temperaturschwankungen und extremer Hitze.

Da die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn stark von Pünktlichkeit und Geschwindigkeit abhängt, sollte die Geschwindigkeitsbegrenzung eine nachgelagerte Maßnahme für den Extremfall bleiben. Im Vordergrund der folgenden Kosten-Nutzen Analyse steht die Anpassung im Schienenbau und der Wartung.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

Für Deutschland liegen bisher keine Kosten- und Nutzenschätzungen zu dieser Maßnahme vor. Verschiedene Forschungsprojekte (u.a. die Chamäleon Research Group sowie das Projekt ARISCC der UIC) beschäftigen sich aktuell mit Kosten und Nutzenaspekten im Bereich der Schieneninfrastruktur, bisher liegen aber keine Ergebnisse vor. Daher kann diese Fallstudie hier nur illustrativ auf Basis von Analysen für andere Länder und Schätzungen für Deutschland dargestellt werden.

**Kostenschätzung**

Insbesondere auf der Kostenseite ist die Quantifizierung sehr komplex, da das Schienennetz in Deutschland sehr heterogen ist und je nach Nutzung unterschiedliche Qualitäten aufweist. So ist der Schienenbau für Hochgeschwindigkeitsstrecken aufgrund der hohen Belastung schon heute qualitativ sehr hochwertig und mit deutlich höheren Kosten verbunden. Diese hoch qualitativen Streckenteile erscheinen somit gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels resistenter, als der Schienenbau im Regionalverkehr.

In Anlehnung an die Erkenntnisse in UK und Informationen des Eisenbahnbundesamtes sind für die Anpassung der Schieneninfrastruktur sowohl höhere Investitionskosten als auch höhere Betriebskosten zu erwarten.

Die Abschätzung der investiven Mehrkosten bei der Instandhaltung des Schienennetzes beruht auf den heutigen Ausgabenstrukturen der Deutschen Bahn. Im Jahr 2008 beliefen sich die Instandhaltungsaufwendungen der DB AG für das Bestandsnetz nach eigenen Angaben auf rund 1,41 Mrd. Euro für alle Eisenbahninfrastrukturunternehmen (Verkehrsinvestitionsbericht BMVBS 2009). Für unsere Berechnung gehen wir davon aus, dass die Kosten für den Erhalt durch den Klimawandel nur geringfügig erhöht werden, da die Änderungen im Laufe der anstehenden Sanierungsarbeiten durchgeführt werden können und die Materialmehrkosten nur gering sind. Es wird von einer Bandbreite von 1% bis 3% Mehrkosten ausgegangen, also zusätzlichen Kosten in Höhe von 14 bis 42 Mio. € pro Jahr.

Bei den Wartungsarbeiten wird davon ausgegangen, dass die Notwendigkeit ständiger Kontrollen erheblich steigen wird und insbesondere in den Monaten mit starken Temperaturschwankungen und hohen Temperaturen die Schienenkontrollen erhöht werden müssen. Wir gehen davon aus, dass dadurch zusätzliche Personalkosten in der Wartung entstehen, die auch beim Einsatz hitzebeständigerer Materialien weiterhin notwendig sind.

Für die Berechnung wird die heutige Mitarbeiterzahl der DB Netze von 40.000 Angestellten im Bereich Fahrwege zugrunde gelegt.[9] Da in den öffentlich zugänglichen Quellen keine Angaben zur Verteilung der Mitarbeiter auf Wartungsbetrieb und Sanierungsarbeiten verfügbar ist, gehen wir davon aus, dass die Mitarbeiter ungefähr gemäß dem Verhältnis der Investitionen zu Betriebskosten entsprechen.[10] Unter Verwendung dieser Annahme sind ca.

---

[9] Deutsche Bahn Konzern, Daten und Fakten 2009: http://www.dbnetze.com/site/shared/de/dateianhaenge/infomaterial/dbnetze/ressortpraesentation__dbnetze.pdf

[10] Gemäß Angaben im Verkehrsinvestitionsbericht wurden im Jahr 2008 für den Erhalt der Schieneninfrastruktur ca. 1,4 Mrd. € investiert, das Bruttoinvestitionsvolumen gesamt betrug 4,6 Mrd. €. Für den Neubau standen somit 3,2 Mrd. € zur Verfügung.

12.000 Mitarbeiter für den Unterhalt der Schieneninfrastruktur notwendig (Kontrollen und Wartung).

Der höhere Kontrollaufwand wird insbesondere in den Monaten mit starken Temperaturschwankungen und mit extremer Hitze anfallen. Zudem ist davon auszugehen, dass nicht das gesamte Streckennetz der Deutschen Bahn betroffen sein wird. Die tatsächliche Vulnerabilität ist abhängig von heutiger Qualität des Oberbaus (Hochgeschwindigkeit/regional) und geographischer Lage der Strecke. Wir gehen hier vereinfachend davon aus, dass der Kontrollaufwand zwischen 3% und 5% steigen wird, d.h. die DB Netze benötigt 360 bis 600 weitere Mitarbeiter. Bei einem durchschnittlichen Jahreslohn (Bruttoarbeitgeberkosten) von 30.000 Euro entspricht dies Mehrkosten in Höhe von 11 Mio. bis 18 Mio. € pro Jahr.

Die Kosten der Anpassungsmaßnahme liegen gemäß dieser illustrativen Schätzung bei 25 bis 60 Mio. € pro Jahr.

**Tabelle 10: Erwarteter Kostenanstieg durch Anpassung der Schieneninfrastruktur**

| In Mio. €/Jahr | Untere Bandbreite | Obere Bandbreite |
|---|---|---|
| Mehrkosten Investitionen im Bestand | 14 | 42 |
| Mehrkosten Wartung | 11 | 18 |
| **Mehrkosten gesamt** | **25** | **60** |

*Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der heutigen Kostenstruktur der DB Netz (Bereich Fahrwege) sowie des Verkehrsinvestitionsplans (BMVBS 2009).*

### Bewertung der Nutzen

Für die Bewertung der ersten Nutzenkomponente dieser Maßnahme wird auf die Methode des „Benefit-Transfer“ zurückgegriffen. Für das Vereinigte Königreich liegen für unterschiedliche Klima-Szenarien detaillierte Schätzungen zu hitzebedingten Verspätungen im Schienenverkehr vor. Die Kosten pro Verspätungsminute beruhen auf Informationen des TRUST Monitoringsystems zum Ablauf des Schienenverkehrs und bilden die Zeitkosten der Passagiere ab. Für die Analyse werden für einzelne Regionen die heutigen hitzebedingten Verformungen und deren Auftretenswahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Temperaturen ausgewertet (Dobney et al. 2010). Auf dieser Basis werden für ein niedriges Klimaszenario (entspricht B1) und ein hohes Klimaszenario (entspricht A1F1) für die Jahre 2020, 2050 und 2080 die Kosten der Verspätungen dargestellt:[11]

[11] B1 und A1F1 beziehen sich auf die vom IPCC verwendeten Klimaszenarien. B1 bezieht sich auf ein Szenario mit Übergang zur Informations- und Wissensgesellschaft und geht daher von niedrigeren Klimafolgen aus. A1F1 geht von einer weiteren starken Nutzung fossiler Energien aus und führt daher zu starken Klimaänderungen. Die Szenarien sind z.B. im vierten Sachstandsbericht IPCC zusammengefasst (IPCC 2007).

**Tabelle 11: Verspätungskosten durch temperaturbedingte Schienenverformungen in UK (mittlere Schätzung)**

| | In Mio. Britischen Pfund | | In Mio. Euro | |
|---|---|---|---|---|
| | Klima niedrig (B1) | Klima hoch (A1F1) | Klima niedrig (B1) | Klima hoch (A1F1) |
| 2050 | 10,9 | 11,7 | 13,0 | 13,9 |
| 2080 | 11,5 | 13 | 13,7 | 15,5 |

*Quelle: Dobney et al. (2010). Der Wechselkurs entspricht dem Wert vom 10.2.2011 mit 1GBP = 1.19 €.*

Die Kosten werden mit Hilfe verschiedener Indikatoren auf die Situation in Deutschland angepasst. Da es sich um Zeitkosten handelt, stehen dabei nicht die Streckenlänger sondern vielmehr das Verkehrsvolumen im Mittelpunkt:

- Verkehrsvolumen im Schienenverkehr: Gemäß Eurostat betrug das Volumen der Fahrgastbeförderung in UK im Jahr 2009 ca. 50,8 Mrd. Personen-km, während es in Deutschland bei 80,8 Mrd. Personen-km lag. Das Volumen in Deutschland ist also etwa um den Faktor 1,6 höher.
- Zeitkosten: Bei der Übertragung der Werte ist auch zu berücksichtigen, dass die Zeitkosten in Deutschland und UK voneinander abweichen können. Analysen des Projekts Heatco, welche auch im EU-Handbuch der externen Kosten im Verkehr (Maibach et al. 2008) verwendet werden, machen jedoch deutlich, dass die Zeitkosten sowohl im geschäftlichen als auch im privaten Reiseverkehr sehr nahe beieinander liegen.
- Auslastung, Kapazitäten: Des Weiteren wäre zu berücksichtigen, dass die verfügbaren Kapazitäten, Auslastungen und das Rollmaterial in Deutschland und UK unterschiedlich sind. Um einen Anpassungsfaktor für diesen Aspekt abzuleiten, liegen jedoch im Rahmen dieser Fallstudie nicht genügend Informationen vor.

Daraus ergibt sich, dass für die Übertragung der britischen-Werte auf Deutschland vor allem das unterschiedliche Fahrgastaufkommen zu berücksichtigen ist. Demnach ergeben sich für Deutschland die folgenden Verspätungskosten, die als Nutzenverluste bei privaten Akteuren anfallen:

**Tabelle 12: Benefit transfer: Verspätungskosten in Deutschland (mittlere Schätzung)**

| | In Mio. Euro | |
|---|---|---|
| | Klima niedrig (B1) | Klima hoch (A1F1) |
| 2050 | 20,6 | 22,2 |
| 2080 | 21,8 | 24,6 |

*Quelle: Dobney et al. (2010). Der Wechselkurs entspricht dem Wert vom 10.2.2011 mit 1GBP = 1.19 €. Der Anpassungsfaktor Fahrgastvolumen beruht auf Daten von Eurostat.*

Parallel zur Fallstudie zur Anpassung der Straßeninfrastruktur ist auch hier davon auszugehen, dass die Anpassungsmaßnahme zu einer Vermeidung zusätzlicher Reparaturarbeiten führt. Da die Reparaturkosten nur schwer abzuschätzen sind, wird hier mit der Annahme gearbeitet, dass die zusätzlichen Reparaturkosten ungefähr in der gleichen

Größenordnung wie die zusätzlichen Investitionskosten der Maßnahme liegen, also bei 14 bis 42 Mio. €.

**Tabelle 13: Zusammenfassung der jährlichen Nutzen der Maßnahme**

| In Mio. €/Jahr | Untere Bandbreite | Obere Bandbreite |
|---|---|---|
| Eingesparte Verspätungskosten | 21 | 22 |
| Eingesparte Reparaturkosten | 14 | 42 |
| **Nutzen gesamt** | **35** | **64** |

**Vergleich Kosten und Nutzen**

Bei der Gegenüberstellung der Werte wird ein weitgehend positives Nutzen-Kosten-Verhältnis deutlich. Nur für den Fall, dass die Kosten an der oberen Bandbreite der Schätzung liegen und die Nutzen dagegen an der unteren Bandbreite, ist das Verhältnis negativ. Diese Einschätzung geht davon aus, dass die betrachteten Maßnahmen zusätzliche Verspätungen im Schienenverkehr weitgehend vermeiden können. Dies stellt eine eher optimistische Annahme dar. Da aber auch die zusätzlichen Materialkosten eher optimistisch geschätzt wurden, erscheint die Einschätzung eines ausgeglichen Kosten-Nutzen Verhältnisses haltbar.

Es sind jedoch weitere Nutzenaspekte zu berücksichtigen, die im Rahmen dieser Fallstudie aber nur schwer zu quantifizieren sind:

- Im Extremfall können Verformungen von Schienen zum Entgleisen von Zügen mit meist schwerwiegenden Folgen führen. Wir gehen davon aus, dass solche Unfälle jedoch nur mit sehr niedriger Wahrscheinlichkeit auftreten werden, da bei extremen Temperaturbedingungen vorsorglich die Geschwindigkeit der Züge reduziert wird. Die Berechnungen für Straßenbeläge zeigen, dass bereits ein Unfall mit zehn Schwerverletzten zu Kosten von 2,3 Mio. € führt.
- Die Aufrechterhaltung von Logistikketten im Schienenverkehr und kombinierten Verkehr stellt einen wichtigen Wettbewerbsaspekt für die deutsche (Export)Industrie dar.
- Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs ein wichtiger Nutzen dieser Maßnahme ist. Der Schienenverkehr ist in den meisten Fällen das am wenigsten klimaschädliche Verkehrsmittel und ein Umsteigen auf andere Verkehrsträger würde zu deutlich höheren Emissionen führen. Somit hat diese Maßnahme indirekt auch Synergien mit dem Bereich Klimaschutz, die entsprechend zu berücksichtigen sind.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Kostenseite im Rahmen dieser Fallstudie sehr grob geschätzt wurde und die ausgewiesenen Mehrkosten wohl eher als obere Schätzung anzusehen sind.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Anpassung der Schieneninfrastruktur an den Klimawandel wird im Sinne einer nachhaltigen Verkehrspolitik als need-to-have Maßnahme angesehen. Ein qualitativ

hochwertiges und vor allem sicheres Angebot im Schienenverkehr erscheint langfristig notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit der Bahn gegenüber anderen Verkehrsträgern zu verbessern und somit einen Beitrag zur Reduktion der $CO_2$-Emissionen im Verkehrsbereich zu leisten. Bei dieser Maßnahme ergeben sich somit Synergien zwischen Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Da die Verkehrsinfrastruktur das Rückgrat einer funktionierenden Volkswirtschaft darstellt, sollte die Maßnahme auch dann umgesetzt werden, wenn die Wirtschaftlichkeit nicht ganz klar ist. Da die Maßnahmen auch er Sicherheit im Schienenverkehr dient, kann von einer hohen Akzeptanz ausgegangen werden.

Die im Rahmen dieser Fallstudie durchgeführte Kosten-Nutzen-Schätzung ist als sehr grob einzuschätzen. Aktuell laufen im Rahmen verschiedener Projekte detaillierte Arbeiten zu Kosten-Nutzen-Schätzungen im Bereich der Schieneninfrastruktur, mit deren Hilfe die Maßnahme weiter verfeinert werden kann. Die Nutzenabschätzungen in der vorliegenden Fallstudie beruhen ausschließlich auf der Quantifizierung der vermiedenen Verspätungskosten. Mit der Quantifizierung weiterer Nutzenaspekte würde der Vergleich von Kosten und Nutzen, der bereits mit den vorliegenden Daten tendenziell positiv ausfällt, noch eindeutiger für die Maßnahme sprechen.

Bei der Bewertung der Flexibilität dieser Maßnahme ist zwischen den investiven Kosten und den Betriebskosten zu unterscheiden. Aufgrund der langen Lebensdauer der Schieneninfrastruktur muss schon ab heute entschieden werden, ob robustere Stahltypen verwendet werden sollen. Da diese Stahltypen nur leicht teurer sind als herkömmliche Stahlarten, und gleichzeitig eine längere Lebensdauer aufweisen ist dieser Teil der Maßnahme als „low-regret“ zu bezeichnen. Die Erhöhung der Kontrolltätigkeit stellt hingegen eine klare „regret“ Maßnahme dar, die ohne den Klimawandel nicht notwendig wäre und auch keinen oder nur geringen Zusatznutzen hat. Gleichzeitig hat diese Maßnahme einen hohen Flexibilitätsgrad, da sie je nach Bedarf kurzfristig zur Anwendung kommen kann.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Kosten- und Nutzenschätzung auf jeden Fall zu verifizieren ist. Die Nutzenschätzung kann entsprechend der Analyse für das Vereinigte Königreich auch für Deutschland im Detail und bottom-up durchgeführt werden. Die Arbeiten für das Vereinigte Königreich sind sehr detailliert und beruhen auf einer Auswertung der Verspätungsstatistik sowie regionaler Klimadaten. Grundsätzlich sollten die Daten für Deutschland auch verfügbar sein, eine entsprechende vertiefende Analyse erscheint sinnvoll.

Zudem sollte die Rolle von Finanzierungs- und Anreizinstrumenten geprüft werden, mit Hilfe derer die Notwendigkeit des vorsorgenden Handels verdeutlicht werden können. Auch heute leistet der Bund - trotz Privatisierung Zahlungen an die DB Netz. Kosten und Nutzen (eingesparte Reparaturkosten) fallen somit zumindest teilweise auf der gleichen Ebene an und können im Rahmen der weiteren Verkehrswegeplanung bzw. Verkehrsinvestitionsplanung berücksichtigt werden.

### Tabelle 14: Auswertung der Maßnahme „Schieneninfrastruktur“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Schutz kritischer Infrastrukturen | Die Maßnahme spielt eine wichtige Rolle bei der Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Bahn. Über die Vermeidung von Unfällen leistet sie zudem einen Beitrag zum Schutz der menschlichen Gesundheit. |
| **Effektivität** | Hoch | Die Verwendung neuer Stahltypen kann die Verformung von Schienen nicht vollständig vermeiden. Bei Bedarf kann es weiterhin notwendig sein, die Geschwindigkeiten bei extremer Hitze zu reduzieren. |
| **Mitnahmeeffekte** | kein | Über die enge finanzielle Verflechtung von Bund und Deutscher Bahn sind Mitnahmeeffekte auszuschließen. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja | Es handelt sich um eine Entscheidung zur Verwendung neuer Materialien und zur Anpassung der Wartungs- und Kontrollarbeiten ab einem bestimmten Zeitpunkt. Durch die Entscheidung entstehen jedoch Anreize zur weiteren Erforschung der entsprechenden Materialien sowie zur Effizienzsteigerung bei Wartungsprozessen. |
| **Reichweite** | National | Die Maßnahme sollte auf nationaler Ebene umgesetzt werden. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Da es sich um die Vermeidung von schweren Unfällen im Schienenverkehr handelt, ist die Akzeptanz für diese Maßnahme hoch. |
| **Regret/No-regret** | Regret | Die Verwendung hitzeresistenterer Stahltypen und die Anpassung der Wartungs- und Kontrollarbeiten wären ohne Klimawandel nicht notwendig. |
| **Szenario-Variabilität** | Nein<br>Reduzierte Wirkung | Es ist nicht genau klar, wie die neuen Materialien bei extremen Temperaturen oder anderen Klimawirkungen reagieren. Es ist davon auszugehen, dass die Sicherheit im Schienenverkehr bei extremen Klimaszenarien abnimmt. |

### 3.1.3 Anpassungsmaßnahme „Wetterdienstleistungen in der Transportbranche“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Weil Produktionsprozesse und Wertschöpfungsketten immer komplexer werden und die Bedeutung der Just-in-time Produktion zunimmt, hat die Transportbranche eine wichtige Funktion für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Volkswirtschaft. Die logistischen Prozesse weisen schon heute komplexe Akteursstrukturen auf, die im Streben nach einer stärkeren Intramodalität weiter zunehmen werden. Diese komplexe Struktur ist bereits heute mit Unsicherheiten bezüglich Auswirkungen von Wetterereignissen konfrontiert. Insbesondere durch die klimabedingten Zunahmen von Extremereignissen wie Starkniederschläge oder Stürme werden diese Unsicherheiten zunehmen und die Planungssicherheit weiter erschweren (Hoffmann et al. 2009, Öörni & Hautala 2007, TRB 2008).

Bereits heute greifen die Akteure der Transportbranche auf Informationen der öffentlichen und privaten Wetterdienste zurück, um ein möglichst reibungsloses Funktionieren ihrer Abläufe zu garantieren (Infras 2008). Anders als im Bereich der Infrastrukturplanung handelt es sich dabei um kurz- bis mittelfristige Informationen, die bei der Planung spezifischer Transportaufträge (Route, Zeitplan, Staffelung, Verkehrsketten, Verkehrsträgerwahl) berücksichtigt werden. Durch die Zunahme von Extremereignissen wird der Klimawandel die logistischen Abläufe vor weitere Herausforderungen stellen. Wetterinformationen werden daher an Bedeutung gewinnen, um die Systemstabilität in der Transportbranche gewährleisten zu können. Um das Verkehrssystem als Rückgrat des Wirtschafts- und Gesellschaftssystem zu sichern, kann auch ein Eingreifen der öffentlichen Hand notwendig werden. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn die Anpassung der Abläufe außerhalb der Entscheidungsstrukturen einzelner Akteure liegt.

Aufgrund der jeweiligen Güteraffinitäten der Verkehrsträger sind die Planungszeiträume dabei unterschiedlich, mit längeren Planungshorizonten im Schienen- und Schiffsverkehr (Öörni & Hautala, 2007).

**Tabelle 15: Zeitliche Relevanz von Wetterinformationen für Verkehrsträger**

| Mode of transport | Historical data and climatolo-gical effects | Nowcasting and warning services | Daily forecasts (12 h–2 days) | Medium-term forecasts (3–5 days) | Medium-term forecasts (5–10 days) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Road traffic** | | XX | X | | |
| **Maritime transport** | | XX | XX | X | X |
| **Aviation** | X | XX | X | | |
| **Railway s** | | X | X | XX | X |

*Quelle: Öörni und Hautala (2007)*

## Kosten- und Nutzenerfassung

Es liegen verschiedene Studien vor, welche die heutige volkswirtschaftliche Bedeutung von Wetterdienstleistungen im Bereich Güterverkehr betrachten (Infras 2008, Öörni & Hautamaki 2007). Konkret existieren aber nur wenige Informationen zu den Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf den Güterverkehrssektor, wie auch im umfassenden ersten Bericht des EU-geförderten FP7-Projekts EWENT (Extreme weather impacts on European networks of transport) deutlich wird (Leviäkangas et al. 2011). Entsprechend sind auch keine Informationen zu den Kosten und Nutzen der Weiterentwicklung dieser Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel verfügbar. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die bereits heute angebotenen Informationen und Prognosen zu Wetter und klimatischen Verhältnissen noch verfeinert werden müssen, wenn die Zahl der Extremereignisse zunimmt. Auf der Nutzenseite steht die Sicherung optimaler Abläufe im Güterverkehr. Basierend auf den heutigen Ergebnissen ist somit davon auszugehen, dass sowohl Kosten und Nutzen bei der Weiterentwicklung steigen werden.

Die Bereitstellung von Wetterdienstleistungen erfolgt im Optimalfall auf privatwirtschaftlicher Ebene. Aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks in der Transportwirtschaft (zwischen Anbietern und zwischen Verkehrsträgern) sind alle Akteure auf zuverlässige Informationen zum Wettergeschehen angewiesen. Es besteht somit eine Zahlungsbereitschaft für die Bereitstellung von lokalen und maßgeschneiderten Informationen. Dies zeigt sich auch daran, dass immer neue Dienstleister in diesem Bereich tätig werden.

Gemäß dieser Beschreibung handelt es sich daher um eine rein private Maßnahme. Aus den folgenden Gründen könnte jedoch eine Teilfinanzierung über öffentliche Mittel angezeigt sein:

- Sofern die private Nachfrage nach Wetterinformationen unter dem gesamtwirtschaftlichen Optimum liegt. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn bei den privaten Akteuren nicht alle Nutzenkomponenten berücksichtigt werden (teilmeritorische Eigenschaften des Gutes).
- Sofern sich die Informationsinteressen der öffentlichen und privaten Akteure überschneiden, z.B. können die entsprechenden Informationen nicht nur für private Transportdienstleister, sondern auch für Tätigkeiten der öffentlichen Hand (z.B. öffentliche Dienstleistungen wie Winterdienst, Müllabfuhr, etc.) genutzt werden (positive externe Effekte).

Die folgende illustrative Berechnung für den Güterverkehr (Straße, Schiene und Binnenschifffahrt) stellt integrierte Werte dar, differenziert also nicht zwischen privaten und öffentlichen Beiträgen.

### Kostenschätzung

Zu den Kosten von Wetterinformationssystemen für den Verkehrssektor liegen bisher keine Informationen vor. Als grobe Näherung kann auf die Kostenstruktur des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen werden. Gemäß Jahresbericht 2009 (DWD 2010) betrug der gesamte Steuermittelbedarf des DWD im Jahr 2009 knapp 174 Mio. €. Gemäß Infras (2008) werden ca. 80% der verfügbaren Mittel für die Bereitstellung von Basisprodukten (öffentlich zugängliche Wetterinformationen) verwendet, die verbleibenden 20% werden für Spezialprodukte verwendet. Anhand dieser groben Annahmen betragen die

Kosten für die Bereitstellung von Spezialprodukten beim DWD circa 35 Mio. €. Auch zu berücksichtigen sind die Erlöse aus der privaten Bereitstellung von Spezialangeboten. Diese Erlöse betrugen beim DWD im Jahr 2009 circa 50,5 Mio. €. Für die Bereitstellung von Spezialprodukten verfügt der DWD somit insgesamt über ein Budget von 85,5 Mio. €.

Diese Spezialangebote werden jedoch nicht nur vom Verkehrssektor in Anspruch genommen. Auch Akteure aus der Energiewirtschaft, dem Gesundheitswesen und Katastrophenschutz, der Landwirtschaft sowie der Versicherungswirtschaft greifen auf Spezialangebote des DWD zurück. Zudem kaufen private Wetterdienstleister Informationen beim DWD ein. Da keine Informationen über die Verteilung der Spezialangebote auf die verschiedenen Nachfragesegmente vorliegen, wird hier vereinfachend davon ausgegangen, dass der Anteil der Transportwirtschaft zwischen 5 und 10%[12] liegt:

**Tabelle 16: Kosten von maßgeschneiderten Wetterinformationen für die Transportwirtschaft**

| | in Mio. € |
|---|---|
| Gesamtes Kostendach für Spezialangebote des DWD | 85,5 |
| Annahme: davon 5% für Transportwirtschaft | 4,3 |
| Annahme: davon 10% für Transportwirtschaft | 8,6 |

*Quelle: Das gesamte Kostendach für die Spezialangebote des DWD ergibt sich aus dem Jahresbericht (DWD 2010).*

Unter diesen Annahmen liegen die heutigen Kosten für die Bereitstellung von speziellen Wetterinformationen für die Transportwirtschaft zwischen 4,3 und 8,6 Mio. Euro. Leider liegen keinerlei Informationen über die Entwicklung dieser Kosten vor, wenn im Zuge des Klimawandels die Angebote weiter verfeinert werden müssen.

### Bewertung der Nutzen

Auf der Nutzenseite dieser Maßnahme ist zu betrachten, wie sich die optimierte Abwicklung von Transporten mit Hilfe von Wetterinformationen auf Qualität und Effizienz des Transportsystems auswirkt. Dabei stehen Pünktlichkeit, Vermeidung von Unfällen sowie die Vermeidung von zusätzlichem Kraftstoffverbrauch durch Umwege im Vordergrund (Infras 2008). Zudem ist zu beachten, dass Informationssysteme dazu beitragen, die Systemstabilität zu gewährleisten, die zur Sicherung von Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft und Lebensstandard der Bevölkerung notwendig ist.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde nur eine Studie gefunden, die diese Aspekte quantifiziert. So wird für die USA ein Nutzen von 29 Mio. USD pro Jahr ausgewiesen, der durch die optimierte Routenwahl im Straßengüterverkehr mit Hilfe von Wetterinformationen entsteht (Adams et al. 2004). Als grobe Näherung kann dieser Wert über den Indikator Beförderungsleistung im inländischen Straßengüterverkehr (tonnen-km) auf Deutschland

[12] Die Spezialangebote des DWD werden hauptsächlich von acht großen Sektoren genutzt. Wir gehen davon aus, dass die Versicherungswirtschaft circa ein Drittel bis die Hälfte aller Spezialangebote nachfragt. Ein weiterer wichtiger Akteur ist die Luftfahrt (mit Fokus Personenverkehr). Für die verbleibenden Sektoren, also auch für die Transportwirtschaft (Landverkehr und Binnenschifffahrt) erscheint ein Anteil von jeweils 5-10% realistisch.

übertragen werden.[13] Dabei ergibt sich ein Wert von 5,2 Mio. USD pro Jahr, was beim aktuellen Wechselkurs[14] circa 3,8 Mio. Euro entspricht. Dieser Wert bezieht sich lediglich auf den Straßengüterverkehr und stellt somit eine untere Bandbreite der Nutzen dar.

**Vergleich Kosten und Nutzen**

Die Kosten-Nutzen Analyse für diese Maßnahme beruht auf einer sehr groben Annäherung und dient lediglich dazu, die Größenordnung der Kosten und Nutzen sowie deren Verhältnis zu erkennen. Es wird deutlich, dass die ausgewiesenen Nutzen von circa 3,8 Mio. € unterhalb der angegebenen Bandbreite der Kosten von 4,3 bis 8,6 Mio. € liegen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass damit nur die Kosten für den Straßengüterverkehr abgebildet sind. Daraus kann zumindest das Fazit gezogen werden, dass diese Anpassungsmaßnahme aus heutiger Sicht wohl ein ausgewogenes Kosten-Nutzen Verhältnis erreichen kann.

Die Kosten und Nutzen beziehen sich dabei auf die heutige Situation. Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Kosten als auch die Nutzen in Zukunft steigen werden und somit ein ausgewogenes Kosten-Nutzen Verhältnis bestehen bleibt.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Bereitstellung von lokalen und passgenauen Wetterinformationen für die Transportwirtschaft scheint gemäß der groben Berechnung ein ausgewogenes Kosten-Nutzen Verhältnis erreichen zu können. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme zeigt sich auch darin, dass es bereits heute einen privaten Markt für entsprechende Wetterdienstleistungen gibt. Über den Erwerb von passgenauen Wetterinformationen können Verkehrsdienstleister ihre Transportkosten reduzieren und sich somit einen Wettbewerbsvorteil verschaffen. Solange dieser private Mechanismus funktioniert, ist kein Eingreifen der öffentlichen Hand notwendig. Bei einer Gefährdung der Systemstabilität in der Transportbranche kann es jedoch notwendig werden, dass die notwendigen Informationen öffentlich zugänglich gemacht werden.

Diese Maßnahme bezieht sich auf sehr kurzfristige Handlungsoptionen und hat sehr starke Überschneidungen mit anderen Bereichen. Auch die anderen Branchen werden in Zukunft spezifischere Wetterinformationen benötigen (z.B. in der Landwirtschaft). Die Generierung dieser Daten ist weitgehend unabhängig von der entsprechenden Nutzung, Unterschiede ergeben sich vor allem in der Aufbereitung. Daher ist davon auszugehen, dass diese Maßnahme in Bezug auf die Anpassung an den Klimawandel hohe Synergieeffekte aufweist. Über die Sicherung der Effizienz im Güterverkehr ergibt sich zudem eine Synergie mit dem Bereich Klimaschutz, da unnötige Umwege und zusätzlicher Treibstoffverbrauch vermieden werden.

---

[13] Quelle: Internationale Statistik des International Transport Forum, inland freight transport. Die Werte beziehen sich auf 2007, da für die USA keine aktuelleren Werte vorliegen.

[14] Wechselkurs vom 17.2.2011: 1 USD = 0,7368 Euro.

Aufgrund der hohen Flexibilität der Maßnahme sowie den großen Synergieeffekten wird diese Maßnahme als eine „no-regret“ Maßnahme eingestuft.

### Tabelle 17: Auswertung der Maßnahme „Wetterdienstleistungen Transport“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to have | Die Maßnahme ist kurzfristig als nice-to-have einzustufen. Sie wird auf rein privater Ebene nachgefragt. Langfristig kann sie aber zur Sicherung der Systemstabilität beitragen. Dann wäre auch eine öffentliche Bereitstellung der Informationen zu prüfen. |
| **Effektivität** | mittel | Die Maßnahme trägt nur dazu bei, möglichst effizient mit den Störungen des Klimawandels auf die Verkehrswege umzugehen. Die Schäden können aber nicht vollständig vermieden werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein (bei privater Finanzierung) bis hoch | Es handelt sich heute um eine reine private Maßnahme. Sobald die Wetterinformationen von der öffentlichen Hand zur Verfügung gestellt werden, entstehen erhebliche Mitnahmeeffekte. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die Bereitstellung von Wetterinformationen dient als Grundlage für eine Anpassung der Strukturen in der Transportbranche. |
| **Reichweite** | National | Die Maßnahme sollte auf nationaler Ebene umgesetzt werden. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Die Maßnahme hat bei den relevanten Akteuren eine hohe Akzeptanz. |
| **Regret/No-regret** | No-regret | Die Maßnahme wird schon bei heutigen Klimaverhältnissen umgesetzt und trägt insgesamt zu einer Verbesserung der Planungssicherheit in der Transportbranche bei. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Die Maßnahme wirkt bei allen Klimaszenarien. Ggf. sind die Wetterinformationssystem weiter zu verfeinern und die Kommunikationskanäle zu verbessern. |

## 3.2 Handlungsfeld Raumplanung

### 3.2.1 Anpassungsmaßnahme „Freihaltung von Frischluftschneisen als Instrument der Raumplanung“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Maßnahmen aus dem Bereich der Raumplanung verfolgen als Querschnittsmaßnahmen meist einen breiten Schutzgedanken, der in verschiedenen Handlungsbereichen wirkt. Die Freihaltung von Frischluftschneisen als Maßnahme der vorsorgenden Raumplanung dient prioritär der Vermeidung von Gesundheitsrisiken, kommt jedoch über die Sicherung der Arbeitsproduktivität auch den Bereichen Industrie und Gewerbe zu Gute. Zudem ergeben sich Synergien beim Schutz von Boden und Biodiversität.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Gesundheit und Wohlbefinden werden besonders in den Städten zu spüren sein, da dort der Wärmeinsel-Effekt die Klimawirkungen verstärkt. Der Wärmeinsel-Effekt entsteht über versiegelten Flächen wie Straßen und Gebäuden, welche die Sonneneinstrahlung absorbieren und in Form von Hitze wieder abstrahlen. Zudem behindert die Versiegelung die Speicherung von Regenwasser zur Verdunstung und große Überbauungen beeinträchtigen den Austausch von Frisch- und Kaltluft. Dies trägt insbesondere zu einem Anstieg der gefühlten Temperatur bei, die sich über mehrere Faktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Frischluftzufuhr bestimmt. Im Rahmen der Raumplanung ist es jedoch möglich, sogenannte Frischluftschneisen zu definieren, die den Wärmeinsel-Effekt reduzieren. Grünzüge und Grünzäsuren ermöglichen die Produktion von Frisch- und Kaltluft und sorgen für eine ausreichende Durchlüftung (ARL 2009, Amt für Umweltschutz Stuttgart 2010).

In der städtischen Planung gibt es verschiedene Eingriffsebenen, um die Auswirkungen bestimmter Flächen auf die Stadtklimatologie zu prüfen:

- Bei der Aufstellung von Flächennutzungsplänen besteht die Möglichkeit einzelne Gebiete als Grünflächen zu sichern oder von vorgesehenen Wohn- oder Gewerbenutzungen in Grünflächen umzuwidmen.
- Auch bei einzelnen Bebauungen kann die Wirkung auf die Frischluftzufuhr berücksichtigt werden. Schon heute legt das Baugesetzbuch fest, dass bei der Prüfung von Bauvorhaben deren Auswirkungen auf Klima und die Gesundheit der Bevölkerung zu berücksichtigen sind.

Diese Anpassungsmaßnahme hat einen vorsorgenden Charakter, sie weist einen langen „time-lag“ zwischen Umsetzung und Anfallen der Nutzen auf. Bei der Bewertung sind Informationen zur künftigen Belastung durch den Klimawandel notwendig und die entsprechenden Städte müssen die Thematik bereits heute in der Raumplanung berücksichtigen. In Deutschland steht die Auseinandersetzung mit dem Thema jedoch erst am Anfang. Aufgrund der bereits heute schwierigen klimatischen Verhältnisse liegen für die Stadt Stuttgart einige Fallbeispiele vor (Amt für Umweltschutz Stuttgart 2010). Zudem befassen sich die KlimZug Projekte „KlimZugNord“, „RegKlam“ und „dynaKlim“ mit dem Aspekt der vorsorgenden Raumplanung, jedoch mit unterschiedlichem Fokus. Weiterhin

liegen für einzelne internationale Metropolen Analysen vor. Rosenzweig et al. (2006) betrachten die Wirkungen von Grünflächen in New York City, wobei sie dabei auf die Bepflanzung bestehender Grünflächen fokussieren. Raumplanerische Vorsorge-Maßnahmen werden nicht betrachtet.

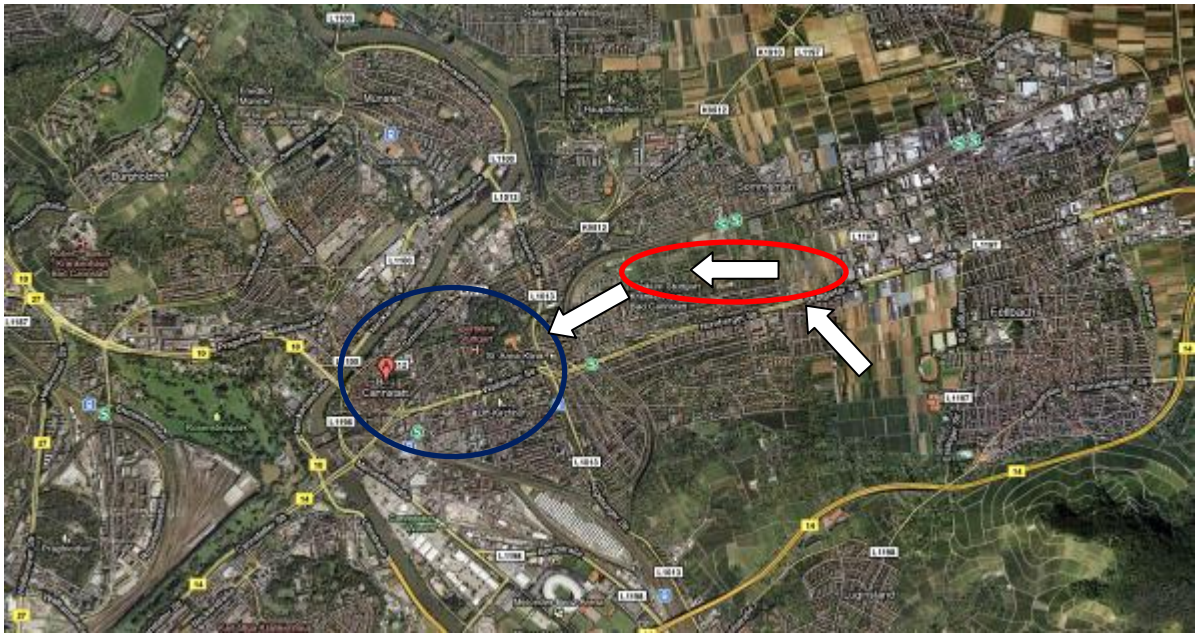
### Kosten- und Nutzenerfassung

Grundsätzlich ist bei dieser Maßnahme zu beachten, dass die Luftaustauschprozesse meist sehr kleinräumig und abhängig von lokalen Charakteristika wie Topographie, Überbauung, etc. sind. Die Kosten und Nutzen für diese Maßnahmen hängen daher zentral von der jeweiligen lokalen Situation ab und können nicht auf Bundesebene hochgerechnet werden. Auf der Kostenseite dieser Maßnahme stehen Opportunitätskosten der alternativen Nutzungen der relevanten Gebiete (Wohn- oder Gewerbenutzungen), die abhängig von Größe, Lage und Verkehrsanbindung sowie der Nachfrage nach Bauland sind. Zudem sind die Kosten für den Unterhalt der Grünflächen zu berücksichtigen. Auf der Nutzenseite stellt sich die Frage, wie viele Einwohner von der Frischluftzufuhr profitieren und wie sich die Frischluftschneise auf die gefühlte Temperatur auswirkt. Diese Angaben lassen sich meist nur über detaillierte stadtklimatologische Gutachten erfassen.

Im Folgenden soll anhand eines Fallbeispiels für die Stadt Stuttgart die Vorgehensweise bei der Kosten- und Nutzen-Berechnung aufgezeigt werden.

Es handelt sich dabei um das Gebiet Espan in Bad Cannstatt, welches im Rahmen der Erstellung des Flächennutzungsplans 1990 ins Interesse der Abteilung Stadtklimatologie gerückt ist. Das Gebiet grenzt direkt an eine bestehende Parkanlage in Bad Cannstatt an und stellt gemäß Analysen der Abteilung Stadtklimatologie eine wichtige Funktion beim Frischluftaustausch zwischen dem unverbauten Ortsrand mit den Grünflächen der dicht bebauten Innenstadt dar. Gleichzeitig würde sich das Gebiet jedoch bestens für andere Nutzungen eignen, da es über einen S-Bahn Anschluss sehr verkehrsgünstig gelegen ist (drei S-Bahn Stationen vom Hauptbahnhof Stuttgart).

**Abbildung 5: Das Gebiet Espan in Stuttgart Bad Cannstatt**



Hinweis: Das Gebiet Espan ist mit dem roten Kreis gekennzeichnet. Die Richtung der Frischluftzufuhr ist über die Pfeile angegeben und wirkt sich vor allem auf das Gebiet Bad Cannstatt Mitte aus (blauer Kreis).

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für die Maßnahme beruht auf einer Analyse der alternativen Nutzungen auf dem Gebiet Espan, der damit zusammenhängenden Wirtschaftskraft sowie der Wirkungen auf die öffentlichen Finanzen der Stadt Stuttgart.

Im Gebiet Espan in Bad Cannstatt war im Flächennutzungsplan 1974 ursprünglich ein großer Erweiterungsbau des bereits angrenzenden Krankenhauses vorgesehen. Das entsprechende Gebiet dafür betrug 1974 über acht Hektar. Schon sehr früh wurde aber die hohe Bedeutung des Gebiets für die Frischluftzufuhr erkannt, so dass die Fläche für den Krankenhaus-Erweiterungsbau über die Jahre reduziert wurde. Im Flächennutzungsplan von 2010 sind nur noch zwei Hektar dafür vorgesehen.

**Abbildung 6: Flächennutzungsplanung im Gebiet Espan 1974-2010**

**Flächennutzungsplan 1974**

**Flächennutzungsplan 2010**

Hinweis: Auf der linken Seite ist der FNP 1974 abgebildet. Die gesamte Fläche des Gebiets Espan ist als Sonderfläche Krankenhaus (orange) gekennzeichnet. Auf der rechten Seite ist der FNP 2010 abgebildet, für das Krankenhaus ist nur noch eine deutlich reduzierte Fläche (pink) vorgesehen.

Für die Berechnung gehen wir davon aus, dass die verfügbare Fläche für gewerbliche und öffentliche Nutzungen im Stadtgebiet Stuttgart insgesamt knapp ist und die Umwidmung der Fläche im Gebiet Espan zu einer Verknappung der gewerblich verfügbaren Fläche führt.[15]

Als Annahme gehen wir weiterhin davon aus, dass jedoch nicht die vollen sechs Hektar (als Differenz zwischen FNP 1974 und FNP 2010) verloren gehen, sondern über die Optimierung im Rahmen der Flächennutzungsplanung nur 50% dieser Fläche relevant sind.[16] Die Freihaltefläche auf dem Gebiet Espan führt somit insgesamt zu einer Verknappung der verfügbaren Gewerbefläche um 3 Hektar. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Anzahl Arbeitsplätze pro gewerblich genutzte Fläche von 180 Arbeitsplätzen/Hektar[17], lässt sich als grobe Näherung sagen, dass circa 500 Arbeitsplätze nicht realisiert werden können.

Die Quantifizierung dieser Nutzungen ist stark vom Blickwinkel abhängig. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ist die Bruttowertschöpfung ein zentraler Indikator. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass die Arbeitsplätze mindestens teilweise an einem anderen Standort (außerhalb der Stadtgrenzen von Stuttgart) realisiert worden sind. Die Bruttowertschöpfung stellt somit die obere Bandbreite der Kostenschätzung dar.

Aus Sicht der Stadt Stuttgart sind insbesondere entgangene Steuereinnahmen von Interesse. Bei gewerblichen Nutzungen stehen dabei die Einnahmen aus der Gewerbesteuer

---

[15] Bei einer detaillierten Analyse müsste betrachtet werden, wohin die geplanten Krankenhaus-Kapazitäten verlegt wurden, welche Nutzungen dort verdrängt wurden, etc. Als Näherung scheint aber die Annahme über die Verknappung der gewerblich nutzbaren Fläche sinnvoll.

[16] Diese Annahme zeigt sich auch in der heutigen Krankenhaus-Planung in Stuttgart. Aktuell werden verschiedene Teile des städtischen Krankenhauses an einem Ort zusammengelegt. Dabei wurde die Bettenzahl im Vergleich zu vorhergehenden Planungen reduziert.

[17] Wirtschaftsdaten der Stadt Stuttgart (2009).

sowie der Grundsteuer im Vordergrund. Zudem wären indirekte und katalytische Effekte zu berücksichtigen, die durch die Arbeitsplätze in Stuttgart anfallen. Dabei wären z.B. Annahmen notwendig, wie viele der Beschäftigten aus dem Gebiet Espan in Stuttgart wohnen würden und welche Einkommens- und Mehrwertsteuer-Einnahmen dadurch entstehen würden. Zur Vereinfachung sollen hier jedoch vor allem die Steuereinnahmen aus der Gewerbesteuer dargestellt werden.

**Tabelle 18: Entgangene Bruttowertschöpfung und Steuereinnahmen im Gebiet Espan (Euro pro Jahr)**

| Indikatoren pro Erwerbstätigen | Stuttgart |
|---|---|
| BWS je Erwerbstätigen (2006) | 65700 |
| Gewerbesteuereinnahmen je Erwerbstätigen | 1790 |

| Entgangene Wertschöpfung und Steuereinnahmen | Gebiet Espan |
|---|---|
| Entgangene BWS | 32.850.000 |
| Entgangene Gewerbesteuereinnahmen | 895.000 |

*Quelle: Amt für Statistik der Stadt Stuttgart, Finanzamt Stuttgart.*

Der Stadt Stuttgart gehen durch die Freihaltefläche somit Steuereinnahmen in Höhe von ca. 0,9 Mio. Euro pro Jahr verloren. Die entgangenen Einnahmen aus der Grundsteuer sind im Rahmen dieser Fallstudie nicht zu berechnen, da dazu detaillierte Angaben zum Einheitswert der nicht realisierten gewerblichen Immobilien notwendig wären. Zudem wären die indirekten Effekte, die über die zusätzlichen Einwohner und deren Ausgaben generiert würden, zu betrachten. Die Kostenschätzung stellt also klar eine untere grobe Schätzung dar.

Zudem sind auf der Kostenseite die Planungs- und Unterhaltskosten zu berücksichtigen. Insbesondere zum Zeitpunkt der Planung der Frischluftschneise können im Bereich der Raumplanung zusätzliche Kosten durch stadtklimatologische oder planerische Gutachten entstehen, die jedoch auf die gesamte Nutzungsdauer der Maßnahme gesehen eher vernachlässigbar sind. Bei den Frischluftschneisen ist zudem zu berücksichtigen, welche Nutzung die entsprechenden Gebiete haben und welche Kosten dadurch für die Stadt entstehen. In Stuttgart wird das entsprechende Gebiet aktuell durch Kleingartenanlagen genutzt, so dass die Kosten hier gering sind. Falls die Freihaltefläche im Sinne einer Parkanlage auch der Naherholung dienen würde, wären zusätzlich die Unterhaltskosten für diese Anlage zu berücksichtigen.

### Bewertung der Nutzen

Auf der Nutzenseite wird primär analysiert, welche Gebiete von der Frischluftschneise profitieren und wie sich die Frischluftschneise auf die gefühlte Temperatur auswirkt. Gemäß Angaben der Abteilung Stadtklimatologie des Amts für Umweltschutz in Stuttgart, wirkt die Frischluftzufuhr des Gebiets Espan insbesondere auf den Stadtteil Bad Cannstatt Mitte (siehe Abbildung 5). In diesem Stadtteil leben aktuell 4170 EW. Da sich die Analyse auf ein zukünftiges Szenario bezieht, sind auf dieser Basis Annahmen für die weitere Entwicklung in diesem Stadtgebiet zu machen. Hier wird davon ausgegangen, dass in diesem Gebiet nur

noch wenig Verdichtungspotential besteht und die Einwohnerzahl bis 2050 um max. 5% zunimmt, also auf 4375 EW.

Detaillierte Angaben zur Wirkung der Frischluftschneise auf die gefühlte Temperatur im Gebiet Bad Cannstatt Mitte liegen aktuell nicht vor. Für eine Analyse wären detaillierte klimatologische Untersuchungen notwendig, wie sie für Stuttgart bereits in anderen Fällen angefertigt wurden.[18]

Für die Quantifizierung der Klimawirkungen auf die menschliche Gesundheit liegen bisher für Deutschland keine spezifischen Schätzungen vor (z.B. in Form von Kosten pro zusätzlichem Hitzetag oder zusätzlichem Grad Temperaturanstieg). Hier wird als grobe Annäherung davon ausgegangen, dass die Frischluftschneise dazu führt, dass der Klimawandel im relevanten Gebiet nur zu einer „starken" Wärmebelastung und nicht zu einer „extremen" Wärmebelastung führt. Diese Differenzierung beruht auf der Studie von Koppe & Jendritzky (2004), welche die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Mortalität in Baden-Württemberg analysiert und auch von Hübler & Klepper (2007) als Basis für die Hochrechnung auf Deutschland verwendet wird. Als Indikator wird der Anstieg der Mortalität für verschiedene Temperaturen verwendet, wobei der minimale Extremwert auf einer linearen Fortschreibung und der maximale Extremwert auf einer exponentiellen Fortschreibung beruhen.

**Tabelle 19: Vermiedene Sterbefälle pro Jahr durch das Gebiet Espan**

| | Anstieg der Mortalitätsraten in % | Sterbefälle je 1000 EW |
|---|---|---|
| Status quo in Stuttgart (2009) | | 9,1 |
| Sterbefälle bei starker Wärmebelastung | 9,3 | 9,9 |
| Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (min) | 12,0 | 10,1 |
| Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (max) | 14,8 | 10,4 |
| | | |
| **Vermiedene Sterbefälle durch Frischluftschneise (min)** | | **0,2** |
| **Vermiedene Sterbefälle durch Frischluftschneise (max)** | | **0,5** |

*Quelle: Für Sterbefälle in Stuttgart: Kommunales Melderegister; für Entwicklung der Sterbefälle bei starker und extremer Wärmebelastung: Koppe & Jendritzky (2004). Die Berechnung der vermiedenen Sterbefälle beruht auf der Annahme, dass der Temperaturanstieg dank der Frischluftschneise nicht als extreme sondern nur als starke Wärmebelastung wahrgenommen wird.*

Die Quantifizierung der vermiedenen Sterbefälle erfolgt in Anlehnung an die Fallstudie zur Maßnahme „Hitzewarnsysteme". Sie beruht auf dem Konzept des „Value of life year lost" und der Annahme, dass pro Sterbefälle im Durchschnitt acht Lebensjahre verloren gehen.

[18] So wurde z.B. für ein anderes Gebiet in Bad Cannstatt ein detailliertes klimatologisches Gutachten erstellt, das die Wirkung der relevanten Fläche auf die Frischluftzufuhr und Temperatur in den angrenzenden Gebieten betrachtet. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Temperaturmessfahrten, Kaltluftausbreitungsuntersuchungen sowie 24-Stunden-Standmessungen zur Luftqualität und Meteorologie durchgeführt, um eine numerische Abschätzung des Kaltluftbildungspotenzials der unversiegelter Freiflächen zu generieren (Quelle: Kuttler et al. 2008).

**Tabelle 20: Vermiedene Kosten durch Sterblichkeit durch Gebiet Espan**

| | Sterbefälle je 1000 EW | Sterbefälle in Bad Cannstatt Mitte |
|---|---|---|
| Vermiedene Sterbefälle durch Frischluftschneise (min) | 0,24 | 1,1 |
| Vermiedene Sterbefälle durch Frischluftschneise (max) | 0,50 | 2,2 |
| Vermiedene Kosten durch Sterblichkeit in € (min) | | 505.000 |
| Vermiedene Kosten durch Sterblichkeit in € (max) | | 1.028.600 |

Zudem führt die verbesserte Frischluftzufuhr zu einer Vermeidung von hitzebedingten Krankheitsfällen und somit Kosten im Gesundheitssystem. Hier liegen leider keine Indikatoren für eine Bottom-up Berechnung vor, so dass eine Näherung durch das „Downscaling“ der Ergebnisse für Deutschland erfolgt.

Hübler & Klepper (2007) machen deutlich, dass durch den Klimawandel bundesweit und pro Jahr ca. 150.000 Krankheitsfälle zu beobachten wären, die insbesondere in extremen Hitzesituationen entstehen. Diese Krankheitsfälle sind jedoch nicht vollständig auf den Klimawandel zurückzuführen. Wie bei den zusätzlichen Todesfällen ergibt sich ein Teil dieser Krankheitsfälle über den Alterseffekt sowie diejenigen hitzebedingten Krankheitsfälle, die bereits unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen zu beobachten sind. Die zusätzlichen Hitzetage (unter Annahme einer unveränderten Bevölkerungsgröße und -struktur) machen 45% und somit knapp 67.200 der Krankheitsfälle aus. Zum Downscaling dieser Ergebnisse ist die Festlegung der Einwohner notwendig, auf die sich dieser Wert von 67.200 Krankheitsfällen bezieht. Dabei nehmen wir an, dass diese Krankheitsfälle vor allem in denjenigen Bundesländern auftreten, in denen der Klimawandel zu überdurchschnittlichen Erwärmungen führt. Dies sind gemäß Regionalem Klimaatlas die Länder Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Thüringen, Rheinland-Pfalz und das Saarland. Über die Einwohnerzahlen lassen sich die zusätzlichen Krankheitsfälle im Gebiet Bad-Cannstatt Mitte schätzen.

**Tabelle 21: Vermiedene Krankenhaus-Einweisungen und Gesundheitskosten (€/Jahr)**

| | Deutschland | Bad Cannstatt Mitte |
|---|---|---|
| Betroffene Einwohner | 36.602.345 | 4.375 |
| Zusätzliche Krankenhaus-Einweisungen | 67.200 | 8,0 |
| Zusätzl. Krankenhaus-Einweisungen pro 1000 EW | 1,8 | 1,8 |
| **Zusätzl. Kosten Gesundheitssystem (in Euro)** | **221.625.600** | **26.400** |

*Quelle: Zusätzliche Krankenhaus-Einweisungen und Kosten für das Gesundheitssystem: Hübler & Klepper (2007). Die von diesen Einweisungen betroffenen Einwohner entfallen auf die überdurchschnittlich vom Temperaturanstieg betroffenen Bundesländer gemäß regionalem Klimaatlas.*

Die Quantifizierung der zusätzlichen Krankenhaus-Einweisungen beruht ebenfalls auf Hübler & Klepper (2007). Diese weisen für die hitzebedingten 67.200 zusätzlichen Krankenhaus-Einweisungen zusätzliche Kosten im Gesundheitswesen von 221,6 Mio. € aus. Dies entspricht pro Einweisung einem Betrag von ca. 3.300 Euro. Bei acht zusätzlichen

Krankenhaus-Einweisungen ergeben sich somit Kosten in Höhe von knapp 26.500 Euro/Jahr.

Für die Quantifizierung der Nutzen könnte auch auf Zahlungsbereitschaften für ein gutes Stadtklima zurückgegriffen werden, die teilweise erheblich von den tatsächlichen monetären Kosten im Gesundheitssystem abweichen können. Brandt (2006) führt in seiner ökonomischen Bewertung des Stadtklimas eine Befragung zu Zahlungsbereitschaften durch. Die Ergebnisse weisen jedoch sehr widersprüchliche Ergebnisse auf. Zudem ist die Methodik der Befragung nicht klar dargelegt, so dass diese Werte hier nicht verwendet werden.[19]

Über die Verbesserung des Stadtklimas wirkt die Maßnahme auch auf die Lebensqualität in Bad Cannstatt und somit auch auf die Wertschöpfung des ansässigen Gewerbes. Ohne die Maßnahme würde der Aufenthalt im Stadtgebiet zunehmend als unangenehm empfunden, was dazu führen würde, dass sich die Treffpunkte der Bevölkerung an andere Orte verlagern würden und die Attraktivität des urbanen Lebens insgesamt sinken würde. Dieser Aspekt ist aufgrund der Unsicherheit der Wirkungsketten jedoch sehr schwer zu quantifizieren.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Frischluftschneisen auch im Bereich Naturschutz und Biodiversität einen hohen Nutzen haben. Städtische Kleingarten- und Parkanlagen bieten heute Lebensraum für viele Tiere und Pflanzen, der bei der Überbauung verloren gehen würde. Hinzu kommt ggf. der Wert als Naherholungsgebiet, falls die Grünflächen öffentlich zugänglich sind. Diese Aspekte wurden jedoch im vorliegenden Fall nicht quantifiziert.

**Vergleich Kosten und Nutzen**

Dieses Fallbeispiel macht deutlich, wie stark das Ergebnis von den getroffenen Annahmen und den lokalen Verhältnissen abhängt. Den entgangenen Steuereinnahmen von 0,9 Mio. € steht hier auf der Nutzenseite eine Bandbreite von 0,5 bis 1,1 Mio. € gegenüber. Auf der Nutzenseite stellt die Vermeidung von zusätzlichen Todesfällen den wichtigsten Faktor dar, also genau derjenige Aspekt, für den die Monetarisierung schwierig ist. Bei der Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen ist zu berücksichtigen, dass diese unterschiedliche Bedeutung für die volkswirtschaftliche Gesamtrechnung bzw. das BIP haben. Die entgangenen Steuereinnahmen auf der Kostenseite sowie die vermiedenen Gesundheitskosten auf der Nutzenseite bilden reine Zahlungsflüsse ab, die sich in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung niederschlagen. Bei den vermiedenen Todesfällen sind dagegen auch Zahlungsbereitschaften enthalten, die sich nicht in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung wiederspiegeln. Dies ist beim Quervergleich mit anderen Anpassungsmaßnahmen, die sowohl auf Kosten- als auch Nutzenseite reine Zahlungsflüsse darstellen, zu berücksichtigen (siehe dazu Infokasten im Kapitel 3.7.1). Leider liegen aber im Rahmen dieser Fallstudie keine Informationen vor, anhand derer die Komponenten der Zahlungsbereitschaften sich aus den vermiedenen Todesfällen herausrechnen ließen.

[19] Im Rahmen der Befragung wurde z.B. für die Vermeidung einer heißen und schlaflosen Sommernacht ein durchschnittlicher Wert von 16 €/Nacht angegeben. Die Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung gesundheitlicher Schäden durch ein schlechtes Stadtklima liegt dagegen nahe bei Null (vgl. Brandt 2006).

Bei der Bewertung ist weiterhin zu berücksichtigen, dass sowohl Kosten- als auch Nutzenschätzung eine untere Bandbreite darstellen. Auf der Kostenseite wären für eine vertiefende Analyse ebenfalls die indirekten Effekte zu berücksichtigen. Die Wirkungen auf die regionale Wertschöpfung stellen dabei einen wichtigen Aspekt dar. Auch auf der Nutzenseite fehlen jedoch mit den Auswirkungen auf Lebensqualität, Naturschutz und Biodiversität wichtige Nutzenkomponenten, die im Rahmen dieser Fallstudie nicht quantifiziert werden konnten.

Obwohl die Kosten bereits heute anfallen und die Nutzen erst in der Zukunft relevant werden, lassen sich die beiden Werte direkt vergleichen. Auf der Nutzenseite beziehen sich die Werte auf heutige Angaben zum Value of life year und die heutigen Ausgaben im Gesundheitssystem. Die Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen stellt somit eine Momentaufnahme für ein zukünftiges Jahr, z.B. 2050 dar. Bei einer Betrachtung über einen bestimmten Zeitraum würde sich die Situation dagegen anders darstellen. Bei der Berechnung eines Nettobarwerts müsste berücksichtigt werden, dass die Nutzen erst längerfristig voll zum Tragen kommen, die Kosten aber bereits heute anfallen. Da jedoch schwer abzuschätzen ist, ab wann die Nutzen der Frischluftschneise einsetzen und eine Annahme über das Ende des Betrachtungszeitraums getroffen werden müsste, verzichten wir hier auf die Anwendung der Nettobarwert-Methode.

Insgesamt zeigt diese Fallstudie für Stuttgart einige Schwierigkeiten der Kosten-Nutzen Bewertung von raumplanerischen Maßnahmen auf:

- Selbst diese sehr kleinräumige Fallstudie erfordert viele Annahmen. Es wird deutlich, wie stark die lokalen Verhältnisse das Ergebnis beeinflussen. Kosten und Nutzen sind abhängig von der alternativen Nutzung der relevanten Fläche sowie der Einwohnerdichte in den angrenzenden Gebieten. Zudem müsste in einer differenzierteren Analyse noch die Altersstruktur der Bevölkerung berücksichtigt werden. Die Größenordnung scheint darauf hinzuweisen, dass Frischluftschneisen eher „teure“ Anpassungsmaßnahmen sind, die aber bei steigenden Wirkungen des Klimawandels positive Nutzen-Kosten Verhältnisse aufweisen können.
- Kosten und Nutzen fallen auf unterschiedlichen Ebenen an. So entstehen die Kosten für die betroffene Kommune, da Gewerbe- und Grundsteuereinnahmen betroffen sind. Die Nutzen fallen dabei eher auf gesamtwirtschaftlicher Ebene an, mit zusätzlichen Todesfällen und Kosten im Gesundheitssystem.
- Die Berechnung der Nutzen basiert auf vereinfachten Annahmen zur Wirkung der Frischluftschneise. Es wird unterstellt, dass der Klimawandel durch die Frischluftschneise nur zu starken Wärmebelastungen und nicht zu extremen Wärmebelastungen im Gebiet Bad Cannstatt Mitte führt. Um diese Wirkungen zu verifizieren, wären sehr aufwändige und kostspielige klimatologische Untersuchungen notwendig, die wiederum auf der Kostenseite zu veranschlagen wären.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Maßnahme der Freihaltung von Frischluftschneisen kann jeweils nur auf Ebene von Fallstudien beurteilt werden. Die Analyse weiterer lokaler Fallstudien könnte eventuell eine grobe Einschätzung erlauben, in welcher Größenordnung das Kosten-Nutzen Verhältnis

einzuordnen ist. Einige zentrale Aspekte sind jedoch unabhängig von der lokalen Situation und gelten für alle vorsorgenden planerischen Maßnahmen:

- Frischluftschneisen sorgen für ein verträglicheres Stadtklima und tragen zur Vermeidung von gesundheitlichen Mehrbelastungen bei. Da auf der Nutzenseite Wirkungen auf die menschliche Gesundheit stehen, handelt es sich um einen „need-to-have“ Bereich.
- Die Maßnahme muss in einen sinnvollen Maßnahmenmix eingebettet werden, damit die Wirkungsweisen voll ausgenutzt werden können. So wirkt die Frischluftschneise im Gegensatz zu end-of-pipe Technologien im Gebäudebereich (v.a. Klimatisierung) insbesondere auch auf die Temperaturen und das Wohlbefinden im Außenbereich. Diese Wirkung kann teilweise auch über grüne Dächer erzielt werden, jedoch ohne die Durchlüftungswirkung. Klimatisierungen im Gebäudebereich zielen dagegen lediglich auf die Temperaturen im Innenbereich ab.
- Die Schaffung von politischer und gesellschaftlicher Akzeptanz für raumplanerische Vorsorge ist sehr schwierig. Das Beispiel in Stuttgart macht dies deutlich, da das betroffene Gebiet bereits seit 1974 einen Streitpunkt zwischen Stadtplanung, lokaler Wirtschaft, Freizeitnutzern und Anwohnern darstellt. In der Regel verfügen die Vertreter der Stadtklimatologie nur über weiche Argumente, die sie gegen harte wirtschaftliche Interessen vertreten müssen. Kosten-Nutzen Analysen können „harte“ Argumente für die Freihaltung von Frischluftschneisen liefern.
- Die Freihaltung von Frischluftschneisen hat eine positive Wechselwirkung mit anderen Umweltbereichen. Sie tragen insbesondere auch zur Reduktion von Smog und der Feinstaubbelastung sowie zur Bewahrung der urbanen Biodiversität bei. Diese Synergien müssten bei einer umfassenden Kosten-Nutzen Bewertung ebenfalls berücksichtigt werden.
- Frischluftschneisen sowie andere Maßnahmen der raumplanerischen Vorsorge sind als „regret“ Maßnahmen zu bezeichnen. Unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten über die Auswirkungen des Klimawandels muss heute entschieden werden, ob eine Fläche freigehalten werden soll oder nicht. Durch die positiven Wechselwirkungen mit anderen Umweltbereichen kann sich jedoch, je nach Maßnahme, ein low-regret Potential ergeben.

Trotz der vielen Unsicherheiten und Schwierigkeiten, die mit der Bewertung dieser Maßnahme einhergehen, stellt sie eine wichtige Anpassungsmaßnahme dar. Daher erscheint es wichtig, die Kommunen bei der Implementierung solcher raumplanerischen Maßnahmen zu unterstützen. Die Bereitstellung eines Argumentariums zur Kosten-Nutzen Erfassung scheint dafür ein guter Anknüpfungspunkt. Dafür wären aber einfach zu verwendende Monetarisierungsindikatoren notwendig (z.B. ein Indikator für Monetarisierung vermiedene Hitzetage, etwa Kosten pro 1000 Einwohner pro vermiedenem Hitzetag). Weiterhin besteht die Möglichkeit, über Finanzierungs- und Anreizinstrumente die Kommunen stärker auf die Thematik aufmerksam zu machen.

### Tabelle 22: Auswertung der Maßnahme „Frischluftschneisen“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Die Maßnahme zielt auf die Vermeidung von Todesfällen und zusätzlichen Krankheitsfällen ab. Es bleibt aber zu prüfen, ob es alternative Maßnahmen gibt. |
| **Effektivität** | Mittel | Die Auswirkungen von zusätzlichen Hitzetagen im städtischen Raum können nur gemildert aber nicht vermieden werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | kein | Es handelt sich um eine rein öffentliche Maßnahme. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Es handelt sich um eine planerische Maßnahme, die den status quo als Vorsorge sichert. |
| **Reichweite** | Lokal bis überregional | Bei Frischluftschneisen handelt es sich um eine sehr lokale Maßnahme. Bei anderen Bereichen der vorsorgenden Raumplanung (z.B. beim Hochwasserschutz) kann die Reichweite dagegen überregionale Dimensionen annehmen. |
| **Akzeptanz** | Mittel | Bei der Akzeptanz sind Gewinner und Verlierer zu unterscheiden. Gewinner sind die Anwohner, die von der Frischluftschneise profitieren. Verlierer sind die Investoren und das lokale Gewerbe, welche das entsprechende Gebiet gerne alternativ nutzen würde. Zwischen den beiden Gruppen kann es Überschneidungen geben. |
| **Regret/No-regret** | Regret | Es handelt sich um eine Regret-Maßnahme. Das entsprechende Gebiet muss heute bereits gesichert werden, die Nutzen sind aber mit Unsicherheiten behaftet. Wenn weitere Nutzenkomponenten in die Betrachtung einbezogen werden hat die Maßnahme ein „low-regret“ Potential. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Die Maßnahme wirkt auch bei extremen Klimaszenarien. |

### 3.2.2 Anpassungsmaßnahme „Grüne Dächer“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Auch diese Maßnahme setzt an der Reduzierung des Wärmeinsel-Effekts in Städten an. In vielen dicht besiedelten Städten besteht am Boden nur noch wenig Freiraum für Grünflächen. Dachbegrünungen stellen daher eine wichtige Option zur Schaffung innerstädtischer Grünflächen dar. Gründächer tragen zur Absorption von Sonnenenergie bei und haben die Fähigkeit zur Speicherung von Niederschlagswasser, welches über die Verdunstung zu positiven Effekten auf Luftfeuchtigkeit und somit Temperatur führt (Banting et al. 2005, Amt für Umweltschutz Stuttgart 2010, Brandt 2006).

Dachbegrünungen sind auf den meisten Dächern möglich, insbesondere Flachdächer können jederzeit problemlos begrünt werden. Der Dachwinkel beschränkt zwar die Begrünung, grundsätzlich ist aber bis zu einem Winkel von 35 Grad eine Begrünung möglich. Von der Dachbegrünung ausgenommen sind in den meisten Fällen denkmalgeschützte Bauten, sowohl aus Gründen des Stadtbildes als auch der problematischen Statik dieser Bauten.[20] Dachbegrünungen sind auch bei Bestandsbauten möglich und können im Rahmen der Dachsanierung durchgeführt werden. Grundsätzlich werden bei begrünten Dächern schnellwachsende Pflanzen eingesetzt, so dass die Wirkung der grünen Dächer schnell einsetzt.

Die Auswirkungen von grünen Dächern zur Anpassung an den Klimawandel wurden bisher nur für wenige Fallbeispiele analysiert. So liegen für einige internationale Metropolen konkrete Modellierungen zur Wirkung von grünen Dächern vor. Für Toronto wird analysiert, dass bei einem Gründachanteil von 50% der Wärmeinseleffekt um ein Grad Celsius reduziert werden kann (Banting et al. 2005). Eine Studie für New York zeigt eine Reduktion der Mittagshitze um ca. 0,4 Grad Celsius auf, bei einer 75%igen Begrünung aller verfügbaren Flachdächer (Rosenzweig et al. 2006). Für Deutschland liegen bisher nur wenige Arbeiten zu diesem Thema vor. Mersmann (2010) analysiert die Wirkung grüner Dächer auf das Stadtklima in Düsseldorf, kommt aber zu keinem signifikanten Beitrag der grünen Dächer. Der Branchenfachverband FBB (Fachvereinigung Bauwerksbegrünung) hat sich bisher nur am Rande mit dem Thema auseinandergesetzt. Der Naturschutzbund NABU führt aktuell das Projekt „Stadtklima im Wandel“ durch, in dem u.a. Best Practice-Beispiele aufgezeigt werden sollen. Im Rahmen dieses Projekts wird insbesondere die Stadt Düsseldorf mit ihrer Gründachkartierung als Vorreiter dargestellt.[21]

---

[20] Persönliche Informationen des Amts für Umweltschutz Stuttgart sowie Vertreter des Fachverbands FBB.

[21] http://www.nabu.de/aktionenundprojekte/stadtklimawandel/

## Kosten- und Nutzenerfassung

Gründächer sind heute aus privatwirtschaftlicher Betrachtung wirtschaftlich und finden daher auch zunehmende Bedeutung. „Klassische“ Kosten-Nutzen Analysen, d.h. einzelwirtschaftliche Analysen ohne Berücksichtigung des Umweltnutzens, wurden für unterschiedliche Dachtypen und Begrünungsformen durchgeführt. Im Vordergrund steht hier vor allem die extensive Dachbegrünung, die zur Erreichung der positiven Wirkungen aufs Stadtklima ausreichend ist. Gemäß Mann (o.J.) liegen die Baukosten von extensiven Begrünungen mit 12€/$m^2$ deutlich höher als bei einem Kiesdach mit 7 €/$m^2$. Das gleiche gilt für die jährlichen Wartungskosten, die bei grünen Dächern 0,5 €/$m^2$ betragen, im Gegensatz zu 0,2 €/$m^2$ bei Kiesdächern. Langfristig rechnen sich grüne Dächer aber über ihre längere Lebensdauer, die nach bisherigen Erkenntnissen als doppelt so hoch eingeschätzt wird. Während „normale“ Dächer bei einer Lebensdauer der Häuser von 40-50 Jahren einmal komplett saniert werden müssen, ist dies bei grünen Dächern nicht notwendig. Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse bisheriger Kosten-Nutzen-Analysen von Gründächern im Überblick dar:

**Tabelle 23: Übersicht bisheriger Kosten-Nutzen Analysen von Gründächern (€/$m^2$)**

| | Kostenvorteil über Betrachtungszeitraum | Kostenvorteil auf ein Jahr umgerechnet |
|---|---|---|
| HÄMMERLE (1995) | 21,44 € / 36 Jahre | 0,60 € |
| HÄMMERLE (2002) | 25,00 € / 40 Jahre | 0,60 € |
| MANSCHEK (1997) | 16,50 € / 30 Jahre | 0,55 € |
| KOLB (1997) extensiv | 6,20 € / 40 Jahre | 0,16 € |
| KOLB (1997) intensiv | 50,40 € / 40 Jahre | 1,26 € |
| HOFFMANN (1998) | 203,50 € / 75 Jahre | 2,71 € |
| KRUPKA (2001) | 11,45 € / 40 Jahre | 0,29 € |
| KRUPKA (2001) | 68,42 € / 40 Jahre | 1,71 € |

*Quelle: Mann (o.J.).*

Trotz ihrer Wirtschaftlichkeit entscheiden sich viele Bauherren und Hausbesitzer heute weiterhin gegen grüne Dächer, da sie oftmals die langfristige Kostenersparnis nicht ausreichend berücksichtigen. Zudem werden optische Gründe sowie Befürchtungen zur Funktionalität gegen grüne Dächer vorgebracht. Aspekte wie die Wirkungen von grünen Dächern auf das Stadtklima gehen zudem in einzelwirtschaftliche Betrachtungen nicht ein. Viele Kommunen arbeiten daher mit Finanzierungs- und Anreizinstrumenten, um den Anteil von grünen Dächern zu erhöhen bzw. deren Nutzung verpflichtend zu machen (vgl. Ansel 2009). Im Folgenden sollen die Kosten- und Nutzen einer solchen kommunalen Maßnahme am Beispiel der Stadt Düsseldorf illustriert werden.

### Kostenschätzung

Auf der Kostenseite dieser kommunalen Maßnahme steht die Förderung von grünen Dächern über Zuschüsse. Viele Kommunen wenden solche Finanzierungsanreize an, um den Gründachanteil auf ihrem Gebiet zu erhöhen. Dahinter steht neben stadtklimatologischen Überlegungen auch das Streben nach einer nachhaltigen Abwasserversorgung, die bei Gründächern aufgrund ihrer Retentionswirkung deutlich vereinfacht wird. Zudem werden grüne Dächer als Klimaschutzmaßnahme berücksichtigt, da sie die Dämmwirkung der Gebäudehülle verbessern.

In Düsseldorf gibt es aktuell ca. 730.000 $m^2$ Gründächer, was circa 3% der gesamten Dachflächen entspricht. Auf Basis der internationalen Studien nehmen wir an, dass der Gründachanteil auf mindestens 50% erhöht werden muss, um eine spürbare Wirkung auf das Stadtklima zu erreichen. Das heißt, dass weiterhin circa 11,5 Mio. $m^2$ Dachfläche begrünt werden müssten.

Für diese Fallstudie gehen wir davon aus, dass die Stadt Düsseldorf diesen Anteil sowohl über Anreizinstrumente (gesplittete Abwassergebühr), über planerische Vorgaben (Vorgaben für Baugebiete) sowie über Finanzierungsinstrumente erhöht. Wir arbeiten dabei mit der Annahme, dass Anreiz- und Finanzierungsinstrumente jeweils gleich bedeutend sind. Die Finanzierung erfolgt somit für 50 % der 11,5 Mio. $m^2$ Dachfläche, also für 5,75 Mio. $m^2$. Dabei wird eine Bandbreite von Fördermitteln pro $m^2$ hinterlegt, die auf Angaben in der Literatur sowie der bisherigen Förderung in Düsseldorf beruht. Gemäß Angaben der Stadt Düsseldorf wurden im Zeitraum 2000-2009 etwa 90.000 $m^2$ Gründach mit einem Volumen von 1,4 Mio. € gefördert (vgl. Mersmann 2010). Dies entspricht einer durchschnittlichen Förderung von 15 €/$m^2$. Gemäß Ansel (2008) liegt die Förderung pro $m^2$ in einer Bandbreite zwischen 10 und 20 Euro. Bei beiden Anknüpfungspunkten liegt die Förderung deutlich über den Differenzkosten, so dass auch gleich ein Teil der höheren Betriebskosten abgegolten wird. Aus diesen Annahmen ergibt sich für das Fallbeispiel Düsseldorf eine Bandbreite für die finanzielle Förderung von 29 Mio. € (bei einem Fördersatz von 5 €/$m^2$) bis 86 Mio. € (bei 15 €/$m^2$). Da jedes Jahr nur eine begrenzte Anzahl von Dächern saniert bzw. neue Häuser erstellt werden, gehen wir davon aus, dass diese Fördermittel nicht in einem Jahr anfallen, sondern sich auf einen Zeitraum von 10 Jahren verteilen.

**Tabelle 24: Notwendige Fördermittel zur Erhöhung des Gründachanteils auf 50%**

| | bei 5 €/m2 | bei 10 €/m2 | bei 15 €/m2 |
|---|---|---|---|
| Finanzielle Förderung, in Mio. € | 29 | 57 | 86 |
| **Finanzielle Förderung pro Jahr, in Mio. €** | **2,9** | **5,7** | **8,6** |

Da grüne Dächer aus privatwirtschaftlicher Sicht schon heute vorteilhaft sind, kann davon ausgegangen werden, dass als Finanzierungsanreiz bereits ein Fördersatz von 5 €/$m^2$ ausreichend wäre.

### Bewertung der Nutzen

Auf der Nutzenseite werden die Wirkungen der grünen Dächer auf das Mikroklima der städtischen Gebiete und somit auf die Gesundheit der Einwohner betrachtet. Methodisch lehnt sich diese Fallstudie dabei an die Berechnung für die Frischluftschneisen an. Da für die

Monetarisierung der Gesundheitskosten keine Werte pro Grad Celsius oder pro Hitzetag vorliegen, wird wiederum davon ausgegangen, dass die Gründächer dazu beitragen, dass der Klimawandel im Betrachtungsraum nicht als extreme Wärmebelastung, sondern nur als starke Wärmebelastung wahrgenommen wird (in Anlehnung an Koppe & Jendritzky 2004 und Hübler & Klepper 2007).

Für die Einwohner, die von der Wirkung der Gründächer profitieren, wird eine große Bandbreite von 5 bis 50% berechnet, da so gut wie keine Informationen für diesen Indikator verfügbar sind.

**Tabelle 25: Nutzen von grünen Dächern über vermiedene Sterbefälle (pro Jahr)**

| | Anstieg der Mortalität in % | Sterbe-fälle je 1000 EW | Annahme zu profitierenden EW in Düsseldorf | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 50% | 30% | 15% | 5% |
| Status quo (Durchschnitt Deutschland) | | 10,4 | | | | |
| Sterbefälle bei starker Wärmebelastung | 9,3 | 11,4 | | | | |
| Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (min) | 12 | 11,6 | | | | |
| Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (max) | 14,8 | 11,9 | | | | |
| | | | | | | |
| Vermiedene Sterbefälle durch grüne Dächer (min) | | 0,3 | 82 | 49 | 25 | 8 |
| Vermiedene Sterbefälle durch grüne Dächer (max) | | 0,6 | 168 | 101 | 50 | 17 |
| | | | | | | |
| **Quantifizierung bei Verlust von 8 Lebensjahren (min) in Mio. €** | | | **39** | **23** | **12** | **4** |
| **Quantifizierung bei Verlust von 8 Lebensjahren (max) in Mio. €** | | | **79** | **48** | **24** | **8** |

*Quelle: Der Status quo Wert zur Sterblichkeit beruht auf den durchschnittlichen Werten für Deutschland, gemäß Statistischem Bundesamt. Der Anstieg der Mortalität bei unterschiedlichen Wärmbelastungen beruht auf Koppe & Jendritzky (2004).*

Die Illustration der Nutzen macht deutlich, dass allein über die Vermeidung von hitzebedingten Todesfällen und bei der niedrigsten profitierenden Einwohnerzahl die Nutzen ein Volumen von 4 bis 8 Mio. € aufweisen. Die Nutzen steigen proportional mit den Annahmen zum Anteil der profitierenden Einwohner.

### Vergleich Kosten und Nutzen

Sowohl Kosten als auch Nutzen sind in heutigen Preisen dargestellt und sind somit direkt vergleichbar. Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung relativ direkt und ohne Zeitverzögerung, so dass Kosten und Nutzen auch ungefähr zeitgleich anfallen und keine Diskontierung notwendig ist.

Selbst bei der unteren Bandbreite der Nutzenschätzung liegen die Nutzen ungefähr in der gleichen Größenordnung wie die Kosten. Insbesondere wenn die realistischeren niedrigen Fördersätze von 5 €/m$^2$ verwendet werden, hat die Maßnahme in fast allen Fällen ein positives Nutzen-Kosten Verhältnis (ausgenommen bei der geringsten Nutzenschätzung). Dieses Verhältnis steigt, je höher der Anteil der profitierenden Einwohner gewählt wird.

Diese illustrative Rechnung macht somit deutlich, dass sich die Förderung von grünen Dächern auch unter restriktiven Annahmen und einer großzügigen Förderquote wohl

rechnen wird. Da grüne Dächer bereits heute wirtschaftlich sind, ist fraglich, ob deren Anteil nicht auch über planerische Vorgaben erhöht werden kann. Die in dieser Fallstudie verwendeten Finanzierungsanreize stellen auf jeden Fall eher eine obere Bandbreite dar. Bei Berücksichtigung weiterer Nutzenaspekte wie (vermiedenen) Gesundheitskosten oder Produktivitätseinbußen sowie einem durch die Retentionswirkung der Dächer verbesserten Regenwassermanagement würde sich das Nutzen-Kosten Verhältnis noch weiter verbessern.

Trotzdem zeigt das Fallbeispiel in Bezug auf Kosten und Nutzen die folgenden Problematiken auf:

- Insbesondere die Quantifizierung der Nutzen basiert auf stark vereinfachenden Annahmen. Die tatsächliche Wirkung von grünen Dächern auf das Stadtklima hängt von den jeweiligen Gegebenheiten ab und ist weiterhin situationsbedingt. Insbesondere bei langen Trockenperioden, in der grüne Dächer kein Wasser mehr gespeichert haben, geht die positive Wirkung der grünen Dächer auf das Stadtklima gegen Null.
- Kosten und Nutzen fallen auf unterschiedlichen Ebenen an. Die Kosten für die Finanzierungsmaßnahme liegen bisher bei Kommunen oder können evtl. über Landesmittel finanziert werden. Die Nutzen fallen dagegen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene an.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Erstellung grüner Dächer ist schon heute aus privater Sicht als wirtschaftlich zu bezeichnen und führt als Anpassungsmaßnahme zu zusätzlichen Nutzen. Grüne Dächer haben gleichzeitig positive Aspekte auf die lokale Luftqualität, verbessern die Situation bei der Abwasserversorgung und haben zudem eine energiesparende Wirkung. Diese positiven Synergieeffekte sind hier nicht quantifiziert, wären bei einer detaillierten Kosten und Nutzenschätzung jedoch zu berücksichtigen. Negative Auswirkungen von grünen Dächern sind bis heute nicht bekannt. Es handelt sich somit um eine klare no-regret Maßnahme. Die Planung dieser Maßnahme wird dadurch erleichtert, dass grüne Dächer ihre Wirkung relativ schnell entfalten und somit ihr Anteil auch kurzfristig erhöht werden kann.

Aufgrund der langen Lebensdauer von Dächern und der Erkenntnis, dass nicht auf allen Dächern eine Begrünung möglich ist, sollte die Stadtplanung bereits heute Anreize für den verstärkten Bau von grünen Dächern setzen. Dies wird in vielen Kommunen schon mit Finanzierungs- und Anreizinstrumenten praktiziert (vgl. Ansel 2008). Während aus Sicht der öffentlichen Finanzen die Anreizinstrumente (z.B. gespaltene Abwassergebühr) im Mittelgrund stehen sollten, ist aus Sicht der Akzeptanz auch die Weiterführung von Finanzierungsmaßnahmen von hoher Bedeutung.

### Tabelle 26: Auswertung der Maßnahme „grüne Dächer“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Die Maßnahme zielt auf die Vermeidung zusätzlicher Todes- und Krankheitsfälle ab. |
| **Effektivität** | mittel | Die Auswirkungen eines Temperaturanstiegs in Städten können nicht vollständig vermieden werden. Zudem hängt die Effektivität von der jeweiligen klimatischen Situation ab. Bei langen Trockenperioden verlieren die grünen Dächer ihre Wirkung. |
| **Mitnahmeeffekte** | mittel | Grüne Dächer sind bereits heute wirtschaftlich, so dass eine Förderung über öffentliche Mittel in den meisten Fällen Mitnahmeeffekte auslösen würde. Daher ist der Einsatz von Finanzierungs- und Anreizinstrumenten genau zu prüfen. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Sobald alle relevanten Dächer begrünt sind, kann keine weitere Wirkung erzielt werden. |
| **Reichweite** | National | Die Maßnahme sollte auf nationaler Ebene umgesetzt werden. |
| **Akzeptanz** | Mittel | Grüne Dächer sind nicht von allen Hausbesitzern akzeptiert, teilweise aus ästhetischen Gründen. |
| **Regret/No-regret** | No-regret | Es handelt sich um eine klare no-regret Maßnahme, da grüne Dächer auch zu einer Verlängerung der Lebensdauer von Dächern beitragen und positiven Zusatznutzen aufweisen. |
| **Szenario-Variabilität** | Nein, Reduzierte Wirkung | Bei extremen Klimaszenarien mit langen Trockenperioden verlieren grüne Dächer ihre Wirkung. |

### 3.2.3 Vertiefung: Anpassungsmaßnahme „Vorsorgende Raumplanung zum Schutz vor Hochwasser“ und Vergleich mit technischer Anpassungsoption

#### Beschreibung der vergleichenden Analyse von Anpassungsmaßnahmen

Vorsorgende Raumplanung kann nicht nur im städtischen Umfeld und zur Vermeidung von Hitzewirkungen eine effektive Anpassung an den Klimawandel gewährleisten. Auch beim Schutz vor Hochwasser kann vorsorgende Raumplanung eine effiziente Alternative zu technischen Hochwasserschutz-Maßnahmen darstellen (Fröhlich et al. 2011). Ein direkter Vergleich dieser beiden Anpassungsoptionen wird in dieser Fallstudie vorgestellt. Insbesondere bei der Erschließung neuer Siedlungsgebiete ist zu analysieren, ob diese Gebiete zukünftig von Hochwasserereignissen gefährdet sind und ob die Gemeinde mit raumplanerischen oder technischen Anpassungsmaßnahmen besser gestellt wird.

Ähnlich wie bei den Frischluftschneisen werden die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der raumplanerischen Anpassungsmaßnahme stark von den lokalen Gegebenheiten und Annahmen beeinflusst. Dies ist auch für die technische Anpassungsoption der Fall. Daher stehen in dieser Fallstudie nicht die Ermittlung eines bundesweiten Kosten-Nutzen Verhältnisses, sondern vielmehr illustrativ die methodischen Ansätze einer regional spezifischen Kosten-Nutzen Betrachtung im Vordergrund. Für eine fiktive Beispielgemeinde an der Elbe stellt sich die Frage, wie sie ihre Siedlungsplanung an die Auswirkungen des Klimawandels anpassen kann. Soll sie:

a) ein geplantes Neubaugebiet nahe am Gewässer für die Bebauung freigeben und dann bei zunehmendem Hochwasserrisiken an der Elbe später Hochwasserschutz-Infrastrukturen zum Schutz dieses Gebietes erstellen, oder

b) die betrachtete Fläche im Sinne der vorsorgenden Raumplanung abtauschen, direkt am Gewässer nicht bauen und stattdessen ein Gebiet ohne Hochwassergefahr als Siedlungsgebiet ausweisen?

Diese beiden möglichen Investitionspfade der Gemeinde mit Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel werden mit der Entwicklung ohne Maßnahmen (Business-as-usual) verglichen, in der die Bauzone am Gewässer ohne weitere Schutzmaßnahmen überbaut wird und bei zunehmendem Hochwasser entsprechende Schäden entstehen. Der Vergleich der beiden Anpassungsvarianten über eine Kosten-Nutzen-Analyse wird dabei sowohl aus Sicht der Gemeinde als auch aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive vorgenommen. Zusätzlich zur Berechnung eines Kosten-Nutzen Verhältnisses werden in dieser Fallstudie die Nettobarwertmethode und die Methode des internen Zinsfußes vorgestellt und angewendet.

Im Rahmen der Anpassungsforschung wurden bisher keine Kosten-Nutzen Analysen zur raumplanerischen Hochwasservorsorge durchgeführt. Im Rahmen des KlimZug Nord Projekts wurde bereits ein „Klimaangepasstes Leitbild“ für eine Gemeinde entworfen (Zimmermann und Knieling 2010), jedoch ohne Kosten-Nutzen Analyse. Mit dem Ansatz „room for water“ stehen auch in den Niederlanden eine Verknüpfung von Hochwasserschutz und raumplanerischen Ansätzen im Vordergrund (Vries und Wolsink 2009). Im Rahmen des Projekts „Climate Change Spatial Planning“ werden in den Niederlanden verschiedene Fallstudien erstellt, in denen jedoch bisher Kosten-Nutzen Betrachtungen ebenfalls nicht im

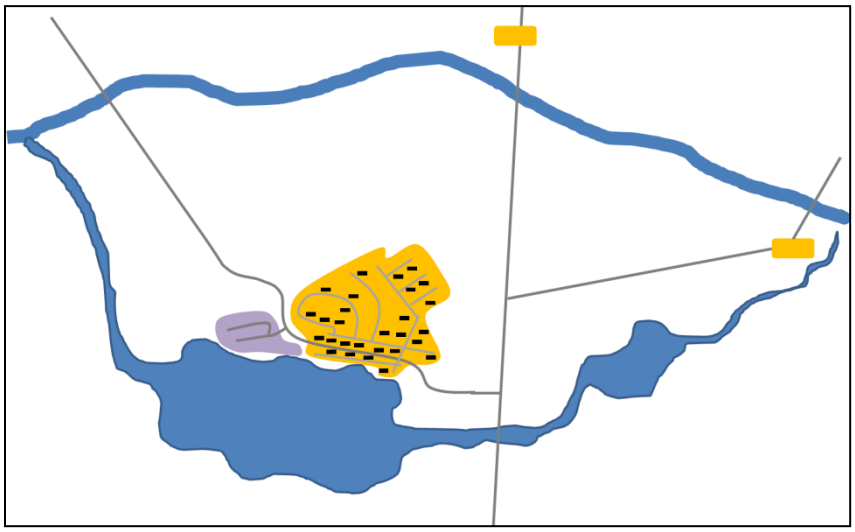
Mittelpunkt stehen. Methodisch kann jedoch auf bestehende Kosten-Nutzen Analysen von Hochwasserschutz-Maßnahmen aufgebaut werden (Dehnhardt et al. 2009).

## Beschreibung der Fallstudie

### Ausgangssituation

Das fiktive Fallbeispiel ist in Abbildung 7 graphisch dargestellt. Die Beispielsgemeinde liegt in Niedersachsen in den Elbauen, zwischen Elbe selbst und einer Flussschlinge, die kleine Seen gebildet hat. Das heutige Siedlungsgebiet (4000 EW) ist in Gelb dargestellt. Der Großteil der Siedlung ist vom Gewässer abgewandt. Nur wenige Häuser liegen direkt am See, mit touristischen Angeboten. An diesem Teil des Sees wurde das Ufer künstlich erhöht, so dass die bisherigen direkt am Ufer gelegenen Gebäude nur selten von Hochwasser betroffen sind.

**Abbildung 7: Fallbeispiel raumplanerische Vorsorge - Ausgangssituation**



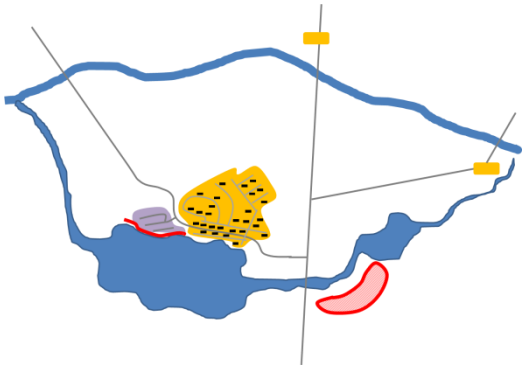
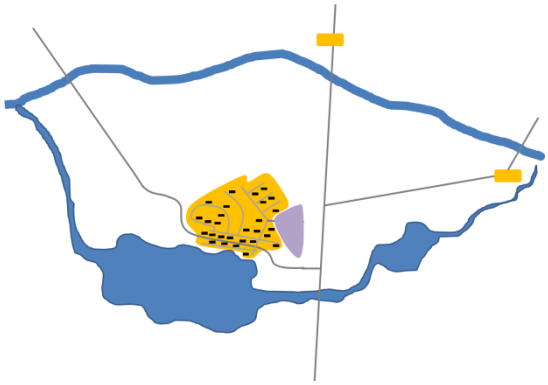
Das bisherige Siedlungsgebiet ist gelb gekennzeichnet. Das geplante Neubaugebiet ist violett hinterlegt.

In der Region besteht weiterhin eine hohe Nachfrage nach attraktivem Wohnraum. Daher hat die Gemeinde bereits vor einigen Jahren ein neues Wohngebiet ausgewiesen, das Wohnmöglichkeiten für 500 EW direkt am See bieten soll (violett auf der Karte). Das Gebiet wurde in der Vergangenheit aufgrund der Lage direkt am Abfluss des Sees trotz des bestehenden alten Deiches regelmäßig überschwemmt. Bei der Planung ging die Gemeinde jedoch davon aus, dass das Hochwassermanagement an der Elbe verbessert und die Flussschlinge weniger häufig von Hochwasser betroffen sein würde. Die Groberschließung des Gebiets für den Verkehr hat bereits stattgefunden, finanziert durch die Gemeinde.

Nun hat die Gemeinde auf einem Klimawandel-Workshop erfahren, dass das Risiko extremer Hochwasser-Situationen an der Elbe weiter steigen wird. Die Gefahr solcher extremen Niederschlagssituationen wird die bisher unternommenen Anstrengungen im Hochwasserschutz an der Elbe überkompensieren. Die Gemeinde muss daher überlegen, ob sie an der geplanten Bebauung im neuen Baugebiet festhält oder eine andere Strategie verfolgt. Beim Festhalten an der bisherigen Planung (BAU) besteht die Gefahr, dass das

Gebiet regelmäßig überschwemmt wird, mit Reparaturkosten für die Gemeinde und der Gefahr von leer stehenden Häusern. Da die Gemeinde sich diesen Gefahren nicht ausliefern möchte, prüft sie zwei Handlungsoptionen: die Anpassung mit Hilfe technischer Hochwasserschutz-Maßnahmen (Option 1) oder die Verlegung des Neubaugebietes als raumplanerische Vorsorge (Option 2).

**Abbildung 8: Alternative Handlungsoptionen**

| Option 1: Technischer Hochwasserschutz | Option 2: Raumplanerische Vorsorge |
|---|---|
|  |  |
| Die technischen Hochwasserschutz-Maßnahmen Deichsanierung und Retentionsbecken sind rot gekennzeichnet. | Das Neubaugebiet wird verlegt: weg vom See in ein weniger attraktives Gebiet am östlichen Siedlungsrand. |

**Option 1: Technischer Hochwasserschutz**

Bei dieser Anpassungsoption steht der technische Hochwasserschutz im Vordergrund. Ein Hochwasserschutz-Konzept sieht dafür folgende technische Maßnahmen vor:

<u>Sanierung des Schutzdeiches direkt vor dem Siedlungsgebiet:</u>

Der bisherige alte Deich liegt mit 3 m unter der durchschnittlichen Höhe der Elbdeiche, da im relevanten Abschnitt bisher keine Siedlungsinfrastrukturen betroffen sind. Die bisherige Deichhöhe schränkt die Attraktivität des Wohngebiets nicht ein. Mit der Sanierung müsste der Deich auf 8 m erhöht werden.[22] Zudem müsste der Deichquerschnitt vergrößert werden. Für den Bau des Deiches wird daher ein Teil des ausgewiesenen Siedlungsraums benötigt. Eine Häuserzeile direkt am See (entspricht 10% der möglichen neuen Einwohner) kann deswegen nicht realisiert werden. Zudem verringert sich die Attraktivität des Wohngebiets, da der Zugang zum See erheblich erschwert und die Seesicht von der Siedlung aus eingeschränkt würde.

Die Vergrößerung des Deichquerschnitts muss zum aktuellen Zeitpunkt in den Bebauungsplänen berücksichtigt werden. Mit der Sanierung des Deiches kann jedoch gewartet werden, bis das Hochwasser-Risiko tatsächlich steigt.

[22] Gemäß DIN 19712 soll bei der Deichhöhe das Bemessungshochwasser sowie ein zusätzlicher „Freibord“ von 1m zugrunde gelegt werden. Da das Fallbeispiel nicht direkt an der Elbe liegt, wird ein Bemessungshochwasser unter den Pegelständen des Elbehochwassers 2002 angenommen.

Retentionsbecken

Zudem wird mit dem Start der Bebauung im neuen Siedlungsgebiet ein großes Retentionsbecken im Oberlauf des Flusses erstellt (rot gekennzeichnet in Abbildung 8, linke Seite).

**Option 2: Vorsorgende Raumplanung**

Alternativ prüft die Gemeinde das Wohngebiet an einen anderen Ort zu verlegen. Da sich am nördlichen Rand der Gemeinde ein Naturschutzgebiet anschließt kommt eine alternative Besiedlung nur am östlichen Rand in Frage. Diese Option ist jedoch etwas weniger attraktiv, da das Gebiet nicht mehr am See liegt. Statt für zusätzliche Einwohner aus der oberen Einkommensschicht, wäre dieses Gebiet eher für mittlere Einkommensschichten interessant.

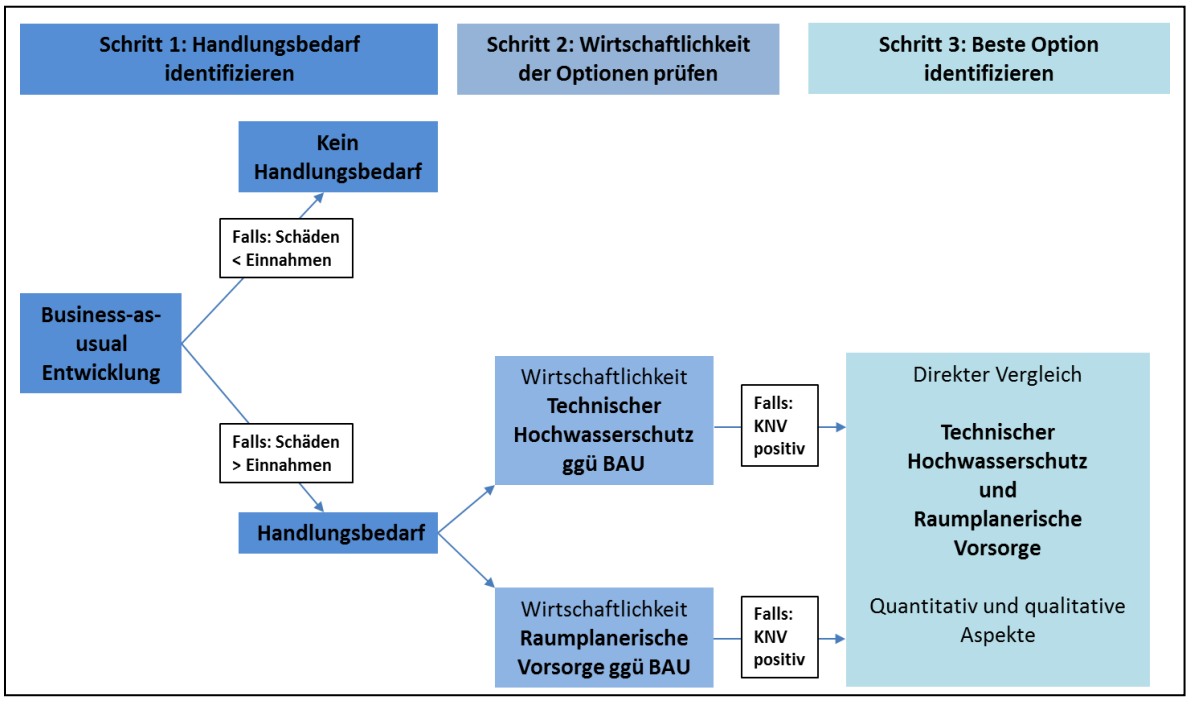
Diese Maßnahme müsste im Sinne einer raumplanerischen Vorsorge sofort umgesetzt werden und das bisherige Siedlungsgebiet ausgezont werden.

## Vorgehensweise bei der vergleichenden Analyse

Die folgende Analyse der Kosten und Nutzen der beiden betrachteten Anpassungsmaßnahmen und deren Vergleich orientiert sich an der Vorgehensweise der kommunalen Planung. In einem ersten Schritt wird untersucht, wie sich der Klimawandel auf die bisher geplante Siedlungsentwicklung auswirkt und ob diese für die Gemeinde aus wirtschaftlicher Perspektive nach wie vor attraktiv ist. Falls dies nicht der Fall ist, besteht in der Gemeinde Handlungsbedarf. In einem zweiten Schritt prüft sie die Wirtschaftlichkeit der verfügbaren Anpassungsoptionen gegenüber der Entwicklung ohne Maßnahmen. Falls beide Optionen vorteilhaft sind, ist in einem dritten Schritt ein direkter Vergleich der beiden Maßnahmen notwendig.

Die Vorgehensweise ist in der folgenden Abbildung zusammengefasst:

**Abbildung 9: Schritte der vergleichenden Analyse von Anpassungsmaßnahmen**




## Kosten- und Nutzenkomponenten der Maßnahme

Vor der Berechnung der Kosten-Nutzen Verhältnisse sind die relevanten Komponenten auf Kosten- und Nutzenseite zu identifizieren und zu beziffern. Die konkreten Kosten und Nutzen der betrachteten raumplanerischen Maßnahme sowie der alternativen technischen Variante hängen stark von den erwarteten Hochwasserereignissen und den betroffenen Siedlungsstrukturen ab. Auch hier lassen sich Kosten und Nutzen somit nur für die konkrete Fallstudie analysieren und nicht für Deutschland hochrechnen.

Die quantifizierbaren Kosten- und Nutzenkomponenten der beiden betrachteten Anpassungsoptionen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst und werden im Folgenden im Detail beschrieben.

**Tabelle 27: Übersicht Kosten- und Nutzenkomponente der Anpassungsoptionen**

| | Kosten | Nutzen |
|---|---|---|
| **Option 1: Technischer Hochwasserschutz** | • Kosten der Deichsanierung<br>• Kosten Retentionsbecken<br>• Entgangene Steuerein-nahmen durch Reduktion und geringere Attraktivität der bebaubaren Fläche (Opportunitätskosten) | • Vermiedene Hochwasserschäden |
| **Option 2: Raumplanerische Vorsorge** | • Erschließung des neuen Siedlungsgebietes<br>• Entgangene Steuerein-nahmen durch geringere Attraktivität des Baugebiets (Opportunitätskosten) | • Vermiedene Hochwasserschäden<br>• Evtl. höhere Steuerreinnahmen durch langfristige Sicherung der Lebensqualität im Wohngebiet |

Diese Kosten-Nutzen-Analyse (Investitionsrechnung) wird für den Betrachtungszeitraum 2010-2065 durchgeführt. Dieser Zeitraum von 50 Jahren entspricht ungefähr der Lebensdauer der Bebauung im neuen Siedlungsgebiet.

### Kostenschätzung

Die Kosten der beiden Anpassungsoptionen setzen sich aus den direkten Kosten der Maßnahme sowie den Opportunitätskosten zusammen.

#### *Opportunitätskosten*

Die Opportunitätskosten ergeben sich aus möglichen Einbußen bei den Steuereinnahmen im Vergleich zum BAU-Szenario. Daher sind in einem ersten Schritt die Steuereinnahmen im BAU-Szenario, unter Berücksichtigung möglicher Hochwasserwirkungen zu berechnen. Die Steuereinnahmen der anderen beiden Szenarien werden dann dem BAU-Szenario gegenübergestellt.

**Tabelle 28: Übersicht Entwicklung der Steuereinnahmen im Fallbeispiel**

| Szenario | Annahmen Steuerentwicklung | Steuern (Preise 2015) |
|---|---|---|
| **BAU 2015-2030** | Aufgrund der vorerst attraktiven Lage können die ursprünglich geplanten 500 Einwohner mit überdurchschnittlichem Einkommen im neuen Wohngebiet angesiedelt werden. Die Einkommen liegen 20% über dem niedersächsischen Durchschnitt. Aufgrund des höheren Einkommens werden diese neuen Einwohner auch höherwertige Immobilien erstellen, so dass auch der für die Grundsteuer relevante Einheitswert der Immobilien höher liegt.<br>Für die Gemeinde relevant wird der Gemeindeanteil von 15% an der Einkommenssteuer (durchschnittl. 268,5 €/EW in Niedersachsen) sowie die | 500 x 406,1 x 1,2 = rund 244.000 €/Jahr |

| | | |
|---|---|---|
| | Grundsteuer berücksichtigt (137,6 €/EW in Niedersachsen).[23] | |
| **BAU 2030-2065** | Mit zunehmenden klimabedingten Hochwasserereignissen sinkt die Attraktivität des Wohngebiets deutlich. Dieser Prozess wird gemäß Annahmen ab 2030 relevant.<br>Zu diesem Zeitpunkt fallen das Einkommen und Immobilienwerte der Haushalte auf den niedersächsischen Durchschnitt. Zudem gibt es eine Leerstandsquote von 15%. | 500 x 0,85 x 406,1 x 1 = rund 173.000 €/Jahr |
| **Technischer Hochwasser-schutz** | Durch die Ankündigung der möglichen Deicher-höhung verliert das Baugebiet an Attraktivität. Es können nur Einwohner mit durchschnittlichem Einkommen angesiedelt werden, die auch nur Immobilien mit durchschnittlichem Wert erwerben.<br>Ein Teil des Baugebiets kann nicht überbaut werden, da der Platz für den größeren Deichquerschnitt freigehalten werden muss. Dies betrifft 10% der Fläche. | 500 x 0,9 x 406,1 x 1 = rund 183.000 €/Jahr |
| **Vorsorgende Raumplanung** | Das alternative Wohngebiet ist weniger attraktiv als die Lage direkt am See. Es können nur Einwohner mit durchschnittlichem Einkommen angesiedelt werden, die auch nur Immobilien mit durchschnittlichem Wert erwerben.<br>Dafür kann die ursprüngliche geplante Zahl von 500 EW realisiert werden. | 500 x 406,1 x 1 = rund 203.000 €/Jahr |

### *Kosten technischer Hochwasserschutz*

Die Kosten für den technischen Hochwasserschutz wurden auf Basis von Referenzbeispielen aus dem Elbe-Einzugsgebiet berechnet (IKSE 2003, LHW Sachsen-Anhalt o.J.).

Gemäß Annahmen erfolgt die Sanierung des Deichs mit Erhöhung und Vergrößerung des Deichquerschnitts im Jahr 2030. Die Länge des relevanten Abschnitts beträgt einen Kilometer. Die Kosten ergeben sich aus den durchschnittlichen Kosten des Hochwasser-Aktionsplans Elbe für die relevanten Gebiete in Niedersachsen (IKSE 2003):

**Tabelle 29: Kostenschätzung Deichsanierung**

| Deichsanierung Niedersachsen | |
|---|---|
| Länge der geplanten Deichsanierung (2003-2015) in km | 59,5 |
| Kosten der Deichsanierung in Mio. € | 115,7 |
| Kosten pro sanierten Deichkilometer in Mio. € | 1,94 |

[23] Quelle: Landesamt für Statistik Niedersachsen.

Das Retentionsbecken wird direkt im Jahr 2015 mit Baubeginn im neuen Wohngebiet erstellt. Angaben aus der Hochwasserschutzkonzeption für Sachsen-Anhalt machen deutlich, dass die Kosten für Retentionsbecken je nach Fassungsvermögen und Möglichkeit der technischen Steuerung sehr stark auseinanderliegen. Für Sachsen-Anhalt sind Retentionsbecken mit Kosten von 0,75 bis 10 Mio. € in Planung. Da es sich im Fallbeispiel nur um ein kleineres Retentionsbecken handelt, erscheint ein Wert am unteren Rand der Bandbreite realistisch. Es werden Kosten von 1,5 Mio. € unterstellt.

Da die Lebensdauern von Deich (50 Jahre) und Retentionsbecken (100 Jahre) über den Betrachtungszeitpunkt hinausgehen, wird in der Kosten-Nutzen-Berechnung am Ende des Betrachtungszeitraums (Jahr 2065) ein Restwert einbezogen.

### *Kosten raumplanerische Vorsorge*

Bei der Verlagerung des Wohngebiets an den östlichen Siedlungsrand fallen erneut die Kosten für die Erschließung an. Auf Grundlage des Erschließungsbeitragsrechts tragen die Gemeinden mindestens 10% der beitragsfähigen Erschließungskosten selbst, der Rest ist umlagefähig. Die äußere Erschließung der Verkehrsnetze ist in der Regel allein durch die Gemeinde zu finanzieren.

Gemäß einer fiskalischen Wirkungsanalyse für neue Baugebiete des DIFU (Reidenbach et al. 2010), entstehen für ein Neubaugebiet mit 15 Einfamilienhäusern einmalige Erschließungskosten für die Gemeinde in Höhe von knapp 334.000 €.

Die Kosten für unser Fallbeispiel ergeben sich durch eine Hochrechnung. Es wird unterstellt, dass die 500 Einwohner auf 170 Einfamilienhäuser verteilt sind (ca. drei Köpfe pro Haushalt). Für 170 EFH betragen die einmaligen Erschließungskosten für die Gemeinde 3,84 Mio. €. Diese Kosten werden direkt zu Beginn der betrachteten Periode fällig. Da auch die Investitionen in die Infrastruktur eine Lebensdauer von 100 Jahren aufweisen, wird am Ende des in der Investitionsrechnung betrachteten Zeitraumes ein Restwert berücksichtigt.

### Bewertung der Nutzen

Die Nutzen der beiden betrachteten Anpassungsoptionen ergeben sich aus den eingesparten Hochwasserschäden. Dafür sind Annahmen zur Entwicklung der Hochwasserereignisse an der Elbe notwendig.[24] Wir unterstellen die folgenden Entwicklungen:

- Ab 2025 steigt das Hochwasserrisiko an der Elbe. Es gibt alle 5 Jahre ein mittleres Überschwemmungsereignis, mit Überschwemmungsschäden an Wohngebäuden und Schäden an der öffentlichen Infrastruktur.

[24] Die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe hat im Oktober 2011 eine Zusammenfassung bisheriger Klimaprognosen für das Abflussregime an der Elbe veröffentlicht. Daraus geht hervor, dass sowohl die Ergebnisse zur Eintrittswahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen als auch zu deren Ausmaß noch mit hohen Unsicherheiten behaftet sind (IKSE 2011). Die hier verwendeten Annahmen müssen somit für weitere Arbeiten bzw. für konkrete Anwendungsbeispiele verifiziert werden.

- Ab 2050 steigt das Risiko weiter an, ein mittleres Hochwasserereignis tritt dann alle 3 Jahre auf.

**Tabelle 30: Übersicht Hochwasserschäden im Fallbeispiel**

| Bereich | Beschreibung Schäden | Schäden (in Preisen 2015) |
|---|---|---|
| **Private Haushalte** | Für die Schäden an den privaten Haushalten werden die Schäden von Referenzereignissen zugrunde gelegt:[25]<br>• Beim Augusthochwasser 2002 an der Elbe betrug der Median der Schäden 35.000 € pro Gebäude<br>• Beim Pfingsthochwasser 1999 in Bayern betrugen die Schäden durchschnittlich 10.000 € pro Gebäude<br>Da es sich im Durchschnitt um mittlere Schadensereignisse handelt, wird der untere Schadenswert der Referenzbeispiele von 10.000 € pro Gebäude verwendet. | 170 x 10.000 = 1,7 Mio. € |
| **Öffentliche Infrastruktur** | Bei der öffentlichen Infrastruktur entstehen jeweils Schäden an den Verkehrsflächen, der Entwässerung und den Grünflächen.<br>Es sind jeweils 5% der einmaligen Erschließungskosten für diese Investitionen betroffen.[26] | rund 149.000 € |

Falls die Steuereinnahmen in einem der Anpassungs-Szenarien höher ausfallen, als im BAU-Szenario handelt es sich ebenfalls um Nutzen.

### Berechnung Kosten-Nutzen Verhältnis der beiden Optionen

Da die Kosten und Nutzen bei den beiden betrachteten Optionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, ist eine Diskontierung der Kosten- und Nutzenströme notwendig. Wenn die Investitionen am Ende der Betrachtungsperiode noch Restwerte aufweisen, werden diese entsprechend als positiver Kapitalwert in der Rechnung berücksichtigt.

Die Diskontrate wird gemäß UBA-Methodenkonvention gewählt (UBA 2007). Da es sich beim betrachteten Zeitraum nicht um eine intergenerationelle Fragestellung handelt und bei den Investitionen durchaus die Frage nach der Wirtschaftlichkeit für private und kommunale Akteure im Vordergrund steht, wird dabei die höhere Diskontrate der Methodenkonvention von 3% als Hauptvariante gewählt. Die niedrigere Diskontrate mit 1,5% wird als Sensitivität betrachtet.

[25] Deutsche Rückversicherung: http://www.deutscherueck.de/uploads/tx_dbdownloads/Schadenprisma1_2005.pdf

[26] Die Investitionen wurden aus dem Fallbeispiel der DIFU-Studie verwendet (Reidenbach et al 2010, S. 113).

Für Kosten und Nutzen werden die Zeitreihen auf einen Gegenwarts- oder Barwert $B_{K,N}$ diskontiert (sprich zu Preise 2015 berechnet). Für die Kosten erfolgt die Berechnung wie folgt:

$$B_K = K_0 + K_1 \frac{1}{1+r} + K_2 \frac{1}{(1+r)^2} + \ldots + K_T \frac{1}{(1+r)^T} = \sum_{t=0}^{T} (K_t \frac{1}{(1+r)^t})$$

Der Zinssatz r entspricht der Diskontrate von 3% bzw. von 1,5%. Der Betrachtungszeitraum endet nach T = 50 Jahren. Für den Nutzen wird der Barwert sinngemäß berechnet.

### Schritt 1: Business-as-usual Szenario als Ausgangspunkt

In einem ersten Schritt untersucht die Gemeinde, ob ihre bisherige Planung auch unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels noch wirtschaftlich ist oder ob ihr Siedlungsentwicklungsplan angepasst werden muss. Dabei werden die erwarteten Steuereinnahmen durch die bisher geplante Überbauung des Wohngebietes den Klimaschäden gegenübergestellt.

Die Barwerte für die Einnahmen und die erwarteten Schäden im Business-as-usual Szenario sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Es wird deutlich, dass unabhängig von der Diskontrate aus Sicht der Gemeinde die Einnahmen deutlich über den erwarteten Schäden an den öffentlichen Infrastrukturen liegen. Das Verhältnis von Schäden zu Einnahmen liegt deutlich unter 1. Wenn jedoch auch die gesamtgesellschaftlichen Kosten, also die Schäden der klimabedingten Zunahme von Hochwasser an den privaten Gebäuden, mitberücksichtigt werden, liegen die Schäden deutlich über den erwarteten Einnahmen. Da bei der niedrigeren Diskontrate von 1,5% den zukünftigen Schäden eine höhere Bedeutung beigemessen wird, steigt das Verhältnis von Schäden zu Einnahmen im Vergleich zu Rechnung mit 3% Diskontrate an.

**Tabelle 31: Diskontierte Einnahmen und Schäden im BAU-Szenario**

**Ergebnisse Business-as-usual Szenario**

| | Diskontrate 3% | | Diskontrate 1,5% | |
|---|---|---|---|---|
| | Sicht Gemeinde | Volks-wirtschaftliche Sicht | Sicht Gemeinde | Volks-wirtschaftliche Sicht |
| Einnahmen (Einkommens- und Grundsteuer) | 5.404.800 | 5.404.800 | 7.143.762 | 7.143.762 |
| Schäden (öffentlichl. Infrastrukturen bzw. Schäden an privaten Gebäuden) | 661.000 (öffentl. Infrastrukturen) | 8.220.400 (zusätzl. Schäden an Wohngebäuden) | 1.023.109 (öffentl. Infrastrukturen) | 12.723.673 (zusätzl. Schäden an Wohngebäuden) |
| **Verhältnis Schäden zu Einnahmen** | **0,12** | **1,52** | **0,14** | **1,78** |

Im Sinne der gesellschaftlichen Verantwortung ergibt sich für die Gemeinde somit auf jeden Fall Handlungsbedarf. Die gesamtwirtschaftlichen Schäden durch die Überbauung des

Wohngebietes liegen deutlich über den Nutzen. Im folgenden Schritt wird untersucht, wie sich die Situation unter den beiden Anpassungsoptionen ändert.

**Schritt 2: Analyse der Wirtschaftlichkeit der Anpassungsoptionen**

Im zweiten Schritt werden die beiden beschriebenen Anpassungsoptionen (Vorsorge und technisch) der Business-as-usual Entwicklung gegenübergestellt. Die Barwerte der Kosten- und Nutzenströme der beiden Anpassungsoptionen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Auf der Kostenseite stehen die notwendigen Investitionen (Deich, Retentionsbecken bzw. Erschließungskosten) sowie verlorene Steuereinnahmen. Auf der Nutzenseite stehen die vermiedenen Hochwasserschäden sowie zusätzliche Steuereinnahmen.

Da aus der engen Sicht der Gemeinde die Business-as-usual Entwicklung weiterhin sinnvoll ist, ergeben sich aus Sicht der Gemeinde(-finanzen) für beide Maßnahmen Nutzen-Kosten Verhältnisse kleiner eins. Das bedeutet, dass aus Sicht der Gemeinde beide Anpassungsoptionen nicht wirtschaftlich sind. Wenn jedoch die gesamtwirtschaftlichen Effekte mit einbezogen werden, liegen für beide Maßnahmen und unabhängig von der Wahl der Diskontrate die Nutzen deutlich über den Kosten.

Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht sollte die Gemeinde somit auf jeden Fall eine der beiden Anpassungsoptionen ergreifen. Der direkte Vergleich erfolgt im nächsten Schritt.

**Tabelle 32: Vergleich Nutzen-Kosten Verhältnis der beiden Anpassungsoptionen**

**Vergleich Technischer Hochwasserschutz und raumplanerische Vorsorge**

| | Diskontrate 3% | | Diskontrate 1,5% | |
|---|---|---|---|---|
| | Option 1: Technisch | Option 2 Vorsorge | Option 1: Technisch | Option 2: Vorsorge |
| Steuereinnahmen ggü. BAU | -601.900 | -68.300 | -597.300 | 130.100 |
| | | | | |
| **Kosten** | | | | |
| Kosten der Maßnahme | -2.440.600 | -3.420.900 | -2.423.800 | -2.937.900 |
| Kosten verlorene Steuereinnahmen | -601.900 | -68.300 | -597.300 | 0 |
| Kosten gesamt | -3.042.500 | -3.420.900 | -3.021.100 | -2.937.900 |
| | | | | |
| **Nutzen Gemeinde** | | | | |
| Vermiedene Hochwasserschäden | 661.000 | 661.000 | 1.023.100 | 1.023.100 |
| Zusätzliche Steuereinnahmen | 0 | 0 | 0 | 130.100 |
| Nutzen gesamt Gemeinde | 661.000 | 661.000 | 1.023.100 | 1.153.200 |
| | | | | |
| **Nutzen Volkswirtschaft** | | | | |
| Vermiedene Hochwasserschäden | 8.220.400 | 8.220.400 | 12.723.700 | 12.723.700 |
| Zusätzliche Steuereinnahmen | 0 | -68.300 | 0 | 130.100 |
| Nutzen gesamt Volkswirtschaft | 8.220.400 | 8.152.100 | 12.723.700 | 12.853.800 |
| | | | | |
| **Nutzen-Kosten Verhältnis Gemeinde** | **0,22** | **0,19** | **0,34** | **0,39** |
| **Nutzen-Kosten Verhältnis VW** | **2,70** | **2,38** | **4,21** | **4,38** |

**Schritt 3: Vergleich der beiden Anpassungsoptionen**

Der direkte Vergleich der beiden Anpassungsoptionen (Tabelle 32) macht deutlich, dass das Nutzen-Kosten Verhältnis der beiden Optionen sehr dicht beieinander liegt. Bei der Hauptvariante mit einer Diskontrate von 3% schneidet die Option des technischen Hochwasserschutzes leicht besser ab. Dies ändert sich jedoch, wenn die Diskontrate nur bei 1,5% festgelegt wird. In diesem Fall kommen die zukünftig höheren Steuereinnahmen der raumplanerischen Option positiv stärker zu tragen und die zukünftigen Schäden werden ebenfalls stärker gewichtet.

Die rein quantitative Kosten-Nutzen Betrachtung führt die Gemeinde also nicht zu einer klaren Entscheidung, ob sie die Option der Vorsorge oder des technischen Hochwasserschutzes wählen soll. Eine Analyse weiterer qualitativer Aspekte kann den Entscheidungsprozess unterstützen. Bei der Option des technischen Hochwasserschutzes ist insbesondere ein wichtiges Restrisiko zu berücksichtigen. Falls im Neubaugebiet zukünftig trotz des verbesserten Hochwasserschutzes Überschwemmungen auftreten, verliert das Gebiet an Attraktivität. Es besteht die Gefahr, dass Häuser zwischenzeitig leer stehen und eine höhere Fluktuation in der Bevölkerung entsteht. Dies wirkt sich insgesamt negativ auf den sozialen Zusammenhalt und die Attraktivität der Gemeinde aus. Bei der raumplanerischen Option mit dem Abtausch des Baugebietes besteht diese Gefahr nicht. Da das Nutzen-Kosten Verhältnis der beiden Optionen so dicht beieinander liegt, steht somit bei einer risikoaversen Planung die Option der vorsorgenden Raumplanung für die Gemeinde eher im Vordergrund.

## Berechnung Nettobarwert und interner Zinsfuß

Im Rahmen von öffentlichen Planungsprozessen werden Kosten-Nutzen Betrachtungen meist nicht mit der hier verwendeten Methodik durchgeführt. Daher sollen zusätzlich zwei Methoden vorgestellt und angewendet werden, die im Rahmen der kommunalen Planung üblicher sind (vgl. Neus 1998):

- Nettobarwert-Methode: Der Nettobarwert (NBW) ist definiert als die Summe der Barwerte der von einer Investition hervorgerufenen Einnahmen, abzüglich der für die Investition notwendigen Ausgaben. Falls der Nettobarwert einen Wert größer 0 annimmt, ist die Investition als vorteilhaft zu bezeichnen. Der Investor erhält in diesem Fall sein eingesetztes Kapital zurück, sowie eine Verzinsung die den zugrundeliegenden Kalkulationszinssatz übersteigt.
- Methode des internen Zinsfußes: Mit dem internen Zinsfuß wird die Rendite einer Investition berechnet. Der interne Zinsfuß ist derjenige Kalkulationszinsfuß, bei dem der Nettobarwert einer Investition den Wert Null annimmt.

Die Ergebnisse bei Anwendung dieser Methoden sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 33: Nettobarwert und interner Zinsfuß der beiden Anpassungsoptionen**

**Übersicht Investitionsrechnung**

| | NBW (in Euro, Diskontrate 3%) | | NBW (in Euro, Diskontrate 1,5%) | | Interner Zinsfuß | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sicht Gemeinde | Sicht Volks-wirtschaft | Sicht Gemeinde | Sicht Volks-wirtschaft | Sicht Gemeinde | Sicht Volks-wirtschaft |
| Technisch | -2.300.000 € | 5.222.000 € | -1.960.000 € | 9.646.000 € | -1% | 8% |
| Raumplanerisch | -2.703.000 € | 4.819.000 € | -1.738.000 € | 9.868.000 € | 0% | 6% |

Die Ergebnisse der **Nettobarwertmethode** spiegeln die Ergebnisse aus der direkten Gegenüberstellung von diskontierten Kosten und Nutzen wieder. Aus Sicht der Gemeinde sind beide Anpassungsoptionen nicht wirtschaftlich, unabhängig von der Wahl der Diskontrate. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht führen dagegen beide Varianten zu einem positiven Nettobarwert. Je niedriger die Diskontrate gewählt wird, desto höher liegt der Nettobarwert. Im Vergleich steht wiederum bei der Diskontrate von 3% die technische Option im Vordergrund. Bei der niedrigeren Diskontrate verschiebt sich das Verhältnis zu Gunsten der raumplanerischen Option.

Auch die Methode des internen Zinsfußes unterstreicht dieses Ergebnis. Sie zeigt, dass aus Sicht der Gemeinde beide Optionen einen negativen Wert bzw. einen Wert von Null annehmen. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ergeben sich jedoch positive Zinsfüße, so dass aus dieser Perspektive beide Optionen wirtschaftlich attraktiver sind.

### Beurteilung der Maßnahme

Dieses Fallbeispiel zeigt einige Schwierigkeiten der Kosten-Nutzen Betrachtung von Anpassungsmaßnahmen. Da Kosten und Nutzen der Maßnahme nicht vollständig bei denselben Akteuren anfallen, besteht die Gefahr, dass der Anpassungsbedarf gar nicht identifiziert wird. Nur wenn die Gemeinde auch die gesamtwirtschaftlichen Kosten mitberücksichtigt, wird der Handlungsbedarf klar deutlich. Die Analyse der beiden Anpassungsoptionen zeigt, dass beide Optionen im betrachteten Zeitraum aus volkswirtschaftlicher Sicht deutlich höheren Nutzen als Kosten mit sich bringen und somit eine der Maßnahmen ergriffen werden sollte.

Beim Vergleich der beiden Handlungsoptionen stehen dann die Akteure der Raumplanung erneut vor Herausforderungen. Bei der Wahl eines Kalkulationszinssatzes, der sich am Kapitalmarkt orientiert, schneidet für den gewählten Zeitraum die technische Option besser ab. Bei einer niedrigeren Diskontrate verschiebt sich das Verhältnis jedoch zugunsten der raumplanerischen Variante. Hier kann die Berücksichtigung qualitativer Aspekte die Entscheidungsfindung unterstützen. Unter Berücksichtigung des verbleibenden Restrisikos und der Gefahr eines Attraktivitätsverlustes ist die Gemeinde im dargestellten Beispiel aus Gesamtsicht gut beraten, die raumplanerische Option zu wählen.

Die Vielzahl der zu treffenden Annahmen zeigt, dass Kosten-Nutzen Analysen für Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Raumplanung nur jeweils für spezifische

Maßnahmen durchgeführt werden können und nur schwer zu verallgemeinern sind. Mit dieser Fallstudie wurden jedoch verschiedene Methoden aufgezeigt, wie eine Kosten-Nutzen Analyse durchgeführt werden kann.

Die beiden Fallstudien zur raumplanerischen Vorsorge (Frischluftschneisen und Hochwasserschutz) zeigen effektive Maßnahmen zur Vermeidung von klimabedingten Risiken. In beiden Fallstudien wird aber deutlich, dass oftmals die Akteure, die die Kosten tragen und die Akteure, die den Nutzen aus der Maßnahme ziehen, auseinanderfallen. Somit wird der Handlungsbedarf bei einer Analyse aus Sicht der öffentlichen Hand oftmals unterschätzt. Hier wären klare Vorgaben und/oder entsprechende Anreizinstrumente für die raumplanerische Praxis notwendig.

**Beurteilung:**

Bei der abschließenden Beurteilung werden beide Handlungsoptionen berücksichtigt:

- Relevanz: Beide Anpassungsoptionen (technisch und Vorsorge) bringen gegenüber dem BAU--Szenario aus gesamtwirtschaftlicher Sicht eine Verbesserung. Nicht nur die technische Maßnahmen sondern auch die raumplanerische Vorsorge trägt zum Hochwasserschutz bei. In diesem Beispiel werden Sachschäden an Gebäuden und Infrastrukturen vermieden, so dass die Relevanz der Maßnahmen als „nice-to-have“ klassifiziert werden kann. Sobald der Schutz der Bevölkerung in den Vordergrund rückt, wären beide Maßnahme als „need-to-have zu bezeichnen.
- Nutzen-Kosten Verhältnis: Das Nutzen-Kosten Verhältnis hängt von der Betrachtungsperspektive ab. Wenn nur die für die Gemeindefinanzen relevanten Kosten und Nutzen betrachtet werden, dann übersteigen die Kosten den Nutzen. Bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung liegen die Nutzen dagegen bei beiden Optionen deutlich über den Kosten. Im direkten Vergleich liegen die Nutzen-Kosten Verhältnisse der beiden Optionen sehr nah zusammen. Die rein quantitative Kosten-Nutzen Betrachtung führt die Gemeinde nicht zu einer klaren Entscheidung, ob sie die Option der Vorsorge oder des technischen Hochwasserschutzes wählen soll. Daher sind zusätzliche qualitative Aspekte in die Analyse einzubeziehen.
- Akzeptanz: Die Akzeptanz der beiden Maßnahmen ist je nach Betrachtungsperspektive unterschiedlich. Bei der kommunalen Verwaltung ist die Akzeptanz für beide Maßnahmen erst einmal niedrig, da bisherige Planungen in Frage gestellt werden müssen und zusätzliche Ausgaben mit den Maßnahmen einhergehen. Mittelfristig dürfte die Akzeptanz jedoch steigen, da über die Maßnahme die Standortattraktivität längerfristig gesichert werden kann. Die Akzeptanz aus Sicht der bestehenden Einwohner ist nicht klar abzuschätzen, da beide Optionen Vor- und Nachteile für die bestehenden Baugebiete haben.
- Wechselwirkungen: Beide Maßnahmen haben einen direkten Bezug zu bereits bestehenden Hochwasserschutzaktivitäten. Mit der technischen Option werden bestehende Hochwasserschutzvorkehrungen verstärkt, die Verlegung des Baugebiets stärkt die vorsorgende Hochwasserschutzplanung.
- Flexibilität: Es handelt sich bei beiden Anpassungsoptionen um regret-Maßnahmen, da bereits zum heutigen Zeitpunkt eine unumkehrbare Entscheidung getroffen werden muss. Bei der Berücksichtigung des technischen Hochwasserschutzes muss ein Teil des Baugebiets für die Deichsanierung frei gehalten werden, daraus ergibt

sich ein Attraktivitätsverlust. Bei einem Abtausch des Wohngebiets ist eine Entwicklung im gehobenen Segment, wie bisher mit der Siedlung direkt am See angestrebt, nicht mehr möglich. Die Gemeinde entscheidet sich damit für einen anderen Entwicklungspfad, vermeidet jedoch das Risiko zukünftiger Hochwasserschäden.

- Variabilität: Beim Kriterium der Variabilität unterscheiden sich die beiden Anpassungsoptionen deutlich. Bei der technischen Hochwasservorsorge bleibt ein Restrisiko bestehen. Wenn die Auswirkungen des Klimawandels stärker als erwartet ausfallen, kann die Attraktivität des Wohngebiets nicht gesichert werden. Falls jedoch die raumplanerische Vorsorge gewählt wird, wird das Restrisiko vollständig ausgeräumt. Die Wirtschaftlichkeit bleibt auch bei anderen Annahmen zum Klimawandel gesichert.

**Tabelle 34: Auswertung der Maßnahme „Raumplanerische Vorsorge und technische Maßnahmen zum Hochwasserschutz“**

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Beide Optionen: Nice-to-have | Die Maßnahmen vermeiden im aufgezeigten Beispiel Hochwasserschäden an Gebäuden und Infrastrukturen. Wenn Schutz der Bevölkerung ins Zentrum rückt, ist Maßnahme als „need-to-have“ einzustufen. |
| **Effektivität** | Technische Option: Mittel | Über die technische Anpassungsoption werden Hochwasserschäden weitgehend vermieden, ein Restrisiko bleibt jedoch bestehen. |
| | Raumplanung: Hoch | Über die raumplanerische Vorsorge werden Hochwasserschäden effektiv vermieden. |
| **Mitnahmeeffekte** | Beide Optionen: keine | Es handelt sich um eine rein öffentliche Maßnahme. Die Investitionen wären ohne die Maßnahme nicht ergriffen worden. |
| **Dynamische Wirkung** | Beide Optionen Nein | Aus beiden Maßnahmen ergeben sich keine zusätzlichen Entwicklungschancen für die Gemeinde. Vor allem die raumplanerische Vorsorge vermeidet aber mögliche Kippeffekte im bisher geplanten Wohngebiet und sichert somit die heutige Lebensqualität der Gemeinde. |
| **Reichweite** | Beide Optionen: Lokal | Die Maßnahme bezieht sich auf die lokale Ebene mit spezifischen Entscheidungsmerkmalen (Größe und Lage der geplanten Wohngebiete, Attraktivität der Wohngebiete, etc.). |
| **Akzeptanz** | Beide Optionen: Mittel | Die Gemeinde muss von ihrer bisherigen Planung abweichen. Mittelfristig wird aber über die Maßnahme der Standort gesichert, was zur Akzeptanz beiträgt. |
| **Regret/No-regret** | Beide Optionen Regret | Es handelt sich in beiden Fällen um Regret-Maßnahmen. Beim technischen Hochwasserschutz muss die Planung angepasst werden. Bei der raumplanerischen Option muss das entsprechende Gebiet heute bereits abgetauscht werden, auch wenn die Hochwasserrisiken nicht ganz sicher sind. |
| **Szenario-Variabilität** | Technische Option: eingeschränkt | Bei der technischen Option bleibt ein Restrisiko an Hochwasserschäden bestehen, mit entsprechenden Auswirkungen auf das Nutzen-Kosten Verhältnis. |
| | Raumplanung: Ja | Die raumplanerische Maßnahme wirkt auch noch bei deutlich extremeren Auswirkungen des Klimawandels. Das Nutzen-Kosten Verhältnis würde sich verbessern. |

## 3.3 Handlungsfeld Finanzwirtschaft

### 3.3.1 Anpassungsmaßnahme „Bereitstellung neuer Versicherungsprodukte bzw. Integration neuer Risiken“

Auch im Bereich Versicherungswesen war das Ziel, grobe quantitative Kosten-Nutzen-Betrachtungen illustrativ zu zeigen. Die Sichtung und Auswertung der aktuellen Literatur hat gezeigt, dass aktuell die Thematik stark diskutiert wird, es aber erst für Teilaspekte möglich ist Kosten- und Nutzenaspekte konkreter zu beziffern. Dieser Eindruck wurde bestätigt durch die direkten Kontakte mit der Versicherungswirtschaft. Zudem erhielten wir durch diese Kontakte einen guten Einblick zum Stand der intensiven Diskussion zu der Thematik in der Branche selbst. Aufgrund fehlender konkreter und detaillierter Daten kann bei der Maßnahme „neue Versicherungsprodukte“ und im nächsten Kapitel „Kooperationslösung Staat-Versicherung“ keine quantitative Kosten-Nutzen-Analyse erstellt werden. Im Folgenden werden daher die wichtigsten Aspekte einer Kosten-Nutzen-Betrachtung qualitativ beleuchtet und wo möglich mit einfach Beispielrechnungen unterlegt.

Versicherungen dienen dem Schutz vor Risiken, die im Einzelfall nicht von einem Individuum oder einer Unternehmung allein getragen werden (können). Das Poolen verschiedener Risikogruppen der Versicherungen ermöglicht die Bewältigung von Schadensereignissen, indem die von allen einbezahlten Risikoprämien den tatsächlich Betroffenen als Entschädigung für die entstandenen Schäden ausbezahlt werden.

Ein vermehrtes Versichern von Gebäuden kann als mögliche Anpassungsstrategie an den Klimawandel angestrebt werden. Neue Versicherungen werden jedoch nur abgeschlossen, wenn ein dazugehöriges Angebot sowie die entsprechende Nachfrage bestehen. Wichtige Grundlage für die Bereitstellung von Versicherungsangeboten ist die möglichst objektive Einschätzbarkeit von Eintrittswahrscheinlichkeiten. Eine Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeiten mit entsprechender Häufung von Schadensfällen einerseits sowie eine Steigerung von Extremschäden mit außerordentlich hohen Schadenssummen andererseits, können es erschweren bzw. unmöglich machen, diese Risiken zu versichern. Auf der anderen Seite werden Angebote nur nachgefragt, wenn potenzielle Versicherungsnehmende über die möglichen, sich eventuell verändernden Risiken informiert sind und die angebotenen Preise den individuellen Risikoeinschätzungen entsprechen. Ein Hemmnis für die Versicherungsnachfrage bilden z.T. das staatliche Fürsorgeverhalten bei Schadensereignissen und private Spenden (vgl. Schwarze und Wagner 2005).[27] Wird solches Verhalten antizipiert, mindern sich die Anreize für risikoexponierte Personen, eine Versicherung abzuschließen.

Fehlende Sensibilisierung für Risiken auf der Nachfrageseite sowie die durch adverse Selektion bedingten hohen Preise für einen Versicherungsschutz können zu einer

[27] Jüngstes Beispiel für solches Verhalten ließ sich bei den Hochwassern im Januar 2011 in Baden-Württemberg beobachten, wo die Regierung sofort Landeshilfen für die Milderung von Schäden Privater versprach (Landesportal Baden-Württemberg, Meldung vom 18.1.2011, www.baden-wuerttemberg.de).

Unterversorgung im betrachteten Versicherungsmarkt führen. Im Fall von Schäden durch Naturereignisse wie z.B. Hochwasser oder Erdrutsch können somit hohe ungedeckte Kosten entstehen. Neben direkten Kosten für den Staat (Wiederherstellung der öffentlichen Sicherheit, Notversorgung, Wiederaufbau) können dem Staat dadurch auch indirekte Folgekosten in beträchtlicher Höhe entstehen, wenn Individuen und Unternehmungen ohne Versicherungen durch solche Ereignisse in ihrer Existenz gefährdet werden (Sozialhilfe, Arbeitslosengelder etc.).

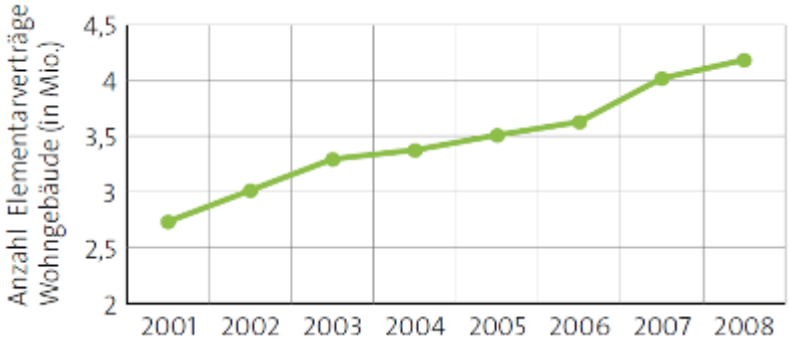
Heute besteht in Deutschland im Bereich des Gebäudeschutzes eine Versicherungsdichte von rund 25% für Elementarversicherungen, welche Schutz vor den Folgen von Naturkatastrophen bieten (Schwarze & Wagner 2006, GDV 2010). Dieser niedrige Versorgungsgrad mit Versicherungsschutz kann daher angesichts des Klimawandels und der künftig erwarteten Schäden durch Naturkatastrophen staatliche Interventionen möglicherweise rechtfertigen. Denkbar ist dabei eine Vielzahl von möglichen Eingriffen. Folgend sollen stellvertretend zwei diesbezügliche Varianten diskutiert werden. Einerseits die Implementierung einer Versicherungspflicht für Gebäude im Bereich der Elementarschäden, wie sie in anderen Ländern bereits eingeführt wurde,[28] andererseits Kooperations-möglichkeiten zwischen Staat und Versicherern.

## Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Mit einer Wohngebäudeversicherung können sich Gebäudebesitzer in Deutschland gegen eine Reihe von möglichen Schäden versichern (Sturm, Blitz, Feuer, Hagel, Leitungswasser). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Versicherungsschutz durch eine Elementarschadenversicherung auch auf Schäden durch Hochwasser, Starkregen, Schneedruck, Erdfall, Erdrutsch, Erdbeben, Lawinen und Vulkanausbruch auszuweiten. Eine praktisch flächendeckende Versorgung mit einer solchen Elementarschadenversicherung konnte jedoch in Deutschland bisher nicht erzielt werden. Noch vor wenigen Jahren lag die Versicherungsdichte der Elementarversicherung bei ungefähr 10% (Schwarze, Wagner 2003 & 2008, Raschky et al. 2008). Mittlerweile liegt der Bundesdurchschnitt bei 26%, gewisse Bundesländer verfügen über höhere Dichten, so etwa Baden-Württemberg oder Sachsen, wo teils über 40% der Gebäude gegen Elementarschäden versichert sind (GDV 2010a). Auch in Bayern ist die Versicherungsdichte nach einer Informationskampagne erheblich gestiegen (vgl. nächste Fallstudie). Nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der absoluten Zahlen der Gebäude mit Elementarversicherung. Ende 2008 gab es in Deutschland insgesamt knapp 18 Mio. versicherte Wohngebäude.

[28] Beispielsweise besteht in Frankreich eine Versicherungspflicht für Naturgefahren. Die Versicherung ist mit Hausrat- bzw. Kfz-Versicherungen gekoppelt (in Form eines Aufschlags von 12%). Eine Übersicht zu den Versicherungslösungen in verschiedenen europäischen Ländern ist im Kapitel „Finanzen/Versicherungen“ im ersten Bericht dieses Forschungsvorhabens (S. 74) dargestellt (Tröltzsch et al. 2011).

**Abbildung 10: Wohngebäude: Verträge mit Elementareinschluss**




Quelle: GDV 2009.

Angesichts der erwarteten zunehmenden Schäden und der größeren Schadenskosten durch den Klimawandel besitzt die Elementarschadenversicherung das Potenzial, Teile dieser Kosten im Sinne einer Anpassungsmaßnahme durch Versicherungslösungen zu internalisieren. An dieser Stelle soll deshalb auf eine mögliche Versicherungspflicht im Bereich Elementarschadenversicherung eingegangen werden. Dabei würde für Gebäude eine Pflicht zum Abschluss einer Elementarschadenversicherung erlassen. Gesetzlich geregelt wäre dann, wer in welchem Umfang welche Arten von Schäden zu versichern hätte. Dadurch könnte ein besseres Risiko-Pooling erzielt die Effekte der Negativauslese vermindert werden. Der Staat müsste dann in geringerem Maße direkte und indirekte Kosten bei Nicht-Versicherten tragen helfen. Die Versicherer wären gezwungen, alle Gebäude zu versichern. Wichtige Kernfragen bei der Implementierung einer Elementar-schadenversicherung beziehen sich auf die Preissetzung (Äquivalenzprinzip oder Durch-schnittspreise) und die Formalitäten beim Übergang vom heutigen zum Pflichtsystem (Übergangsfristen). Diese bestimmen in wesentlichem Maße die Eignung eines neuen Versicherungsregimes im Bereich Elementarschaden.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Nach der Jahrhundertflut an der Oberelbe 2002 wurde die Versicherungspflicht für Elementarschäden bereits einmal diskutiert. Aus verschiedenen Gründen wurde sie in Deutschland nicht implementiert. Im Rahmen der Vorarbeiten zu einer möglichen Versicherungspflicht 2004 bezifferte der GDV damals die zu erwartenden Höchstschäden auf rund 30 Mrd. Euro pro Jahr (mehrere 300-Jahres-Ereignisse, resp. ein 1000-jähriges-Ereignis in einem Jahr; Schwarze, Wagner 2005). Weiter ließen sich gemäß GDV jedoch lediglich 8 Mrd. Euro pro Jahr am weltweiten Rückversicherungsmarkt unterbringen. Das Risiko für die Zahlung der restlichen möglichen 22 Mrd. Euro müsste auf weitere haftende Institutionen (Eigentümer, Staat, Fonds etc.) übertragen werden. Gemäß aktuellen Aussagen seitens der Versicherungswirtschaft seien durch die Weiterentwicklung der Risikomodelle sowie anderweitige Verbesserungen im Versicherungsmarkt (breiterer Markt, bessere internationale Verteilung der Risiken) die erwarteten Schadenskosten heute jedoch tragbar für den Sektor.

Die Kosten für Eigentümer von Gebäuden lassen sich anhand der am Markt angebotenen Versicherungen genauer angeben: Ein Versicherungspaket (Wohngebäude- und Elementarschadenversicherung) kostet je nach Anbieter und Wohnort für ein Standardhaus zwischen 240 und 460 Euro pro Jahr (Finanztest 2007), die Wohngebäudeversicherung

separat zwischen 180 und 450 Euro. Die sich aus der Differenz dieser beiden Angebote ergebenden Kosten für die Elementarschadenversicherung decken sich mit Angaben in früheren Untersuchungen. Sie belaufen sich auf 40 bis 450 Euro pro Jahr (Finanztest 5/2004). Aktuelle Zahlen aus einer Informationskampagne in Bayern veranschlagen die Kosten für die meisten Einfamilienhäuser auf ca. 90 Euro pro Jahr (Bayrische Staatsregierung 2010). Ähnliche Kosten werden auch in Schwarze & Wagner (2008) zitiert. Für ein Eigenheim im Wert von ca. 300'000 Euro werden in einer günstigen Risikozone jährliche Prämien von 150 Euro, in der ungünstigsten Risikozone mehr als 500 Euro (sowie größerer Selbstbehalt) veranschlagt. Es gilt anzumerken, dass Elementarschadenversicherungen praktisch bei allen Anbietern mit einem Selbstbehalt von einigen hundert bis einigen tausend Euro einhergehen.

Aktuell stützen sich Versicherungen bei der Vergabe von Elementarschadenversicherungen auf das vom GDV entwickelte Geoinformationssystem ZÜRS (Zonierungssystem für Überschwemmungen, Rückstau und Starkregen) ab. Darin werden vier Gefährdungsklassen unterschieden, wobei für Gebäude in den beiden tiefsten Kategorien (Hochwasser einmal in 10 resp. 10–50 Jahren) Versicherungen nur unter zusätzlichen Auflagen (höherer Selbstbehalt, Risikozuschläge) resp. gar keine Versicherungen abschließbar sind. In Deutschland fallen laut Informationen des GDV nur wenige Wohngebäude in die tiefsten Kategorien, für über 98% der Bevölkerung lassen sich standardisierte Lösungen finden.

Für eine grobe Darstellung der Kosten werden in der folgenden Tabelle die ungefähren Prämieneinnahmen für alle Wohngebäude in Deutschland aus der Elementarversicherung für unterschiedliche Prämienhöhen gezeigt. Nicht berücksichtigt sind Spezialprämien für besonders exponierte Gebäude (Basis: Wohngebäude in Deutschland 2009). Diese Bruttobeiträge sollten nun ungefähr die Schadensaufwendungen sowie die Verwaltungskosten seitens der Versicherer abdecken (z.B. Personalaufwendungen). Die Verwaltungskosten der Versicherer stellen die eigentlichen Kosten der Anpassungsmaßnahme „Versicherungspflicht“ (im Sinne von Kosten für die Erbringung des Versicherungsschutzes) dar. Bei einer Prämienhöhe von 200 Euro pro Jahr belaufen sie sich auf rund 0.9 Mrd. Euro.

**Tabelle 35: Prämieneinnahmen und Erbringungskosten bei Versicherungspflicht**

| Prämienhöhe je Wohngebäude (in € p. a.) | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Einnahmen bei Versicherungspflicht (in Mrd. € p. a.) | 0.90 | 1.80 | 2.70 | 3.61 | 5.41 | 7.21 | 9.01 |
| Verwaltungskosten der Versicherer (in Mrd. € p.a.) | 0.23 | 0.45 | 0.68 | 0.90 | 1.35 | 1.80 | 2.25 |

*Quelle: Destatis, eigene Berechnungen. Annahme, dass 25% der Versicherungsbeiträge für die Bereitstellung des Versicherungsangebotes benötigt werden.*

Weitere Kostenaspekte, die es für die Maßnahme zu berücksichtigen gilt, die an dieser Stelle jedoch nicht quantifiziert werden, sind:

- Aufgrund der heutigen tiefen Versicherungsdichte würden die aufgeführten Prämien zu einem großen Teil die Budgets von Haushalten und Unternehmungen zusätzlich

belasten, was Ausgaben für Konsum und Investitionen in anderen Bereichen schmälern kann (Verdrängungseffekte). Es gilt jedoch auch anzumerken, dass diese Kosten im Schadensfall auch ohne Versicherungspflicht anfallen können.

- Je nach Ausgestaltung der Versicherungspflicht könnten neue Ausgleichszahlungen für Haushalte mit niedrigem Einkommen notwendig werden.
- Die Neugestaltung der Rahmenbedingungen im Versicherungsmarkt für Elementarschäden hätte auch Auswirkungen auf die Anreize der Versicherer selber, welche berücksichtigt werden müssen.
- Letztlich sind auch Kosten für die Ausarbeitung des Gesetzes und der Bestimmungen sowie für ihre Umsetzung zu berücksichtigen. Das Ausmaß dieser Regulierungskosten ist schwierig zu beziffern.

**Bewertung der Nutzen**

Eine Versicherungspflicht für Elementarschäden bringt eine Reihe von Vorteilen, die in ihrer Summe allerdings schwierig zu quantifizieren sind. Der Hauptnutzen entsteht durch die Internalisierung der Schadenskosten, falls der Staat ansonsten die Kosten übernommen hätte. Dadurch werden idealerweise Anreize gesetzt, mögliche Schäden durch Naturkatastrophen zu vermeiden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Ausgestaltung der Versicherung bei Gebäudebesitzern Anreize vermeidet, angezeigte Anpassungsmaßnahmen nicht durchzuführen, gerade weil man versichert ist (Moral Hazard). Die monetarisierte Größenordnung dieser Anreize ist im Rahmen dieser Ausführungen nicht quantifizierbar. Sie hängen aber stark von der Ausgestaltung der Versicherungspflicht – insbesondere der Möglichkeit einer risikobasierten Preissetzung – ab (langfristige Signalwirkung der Versicherungsprämien). Ziel der Prämienhöhe ist immer auch eine Information für den Versicherungsnachfragenden über die Höhe seiner Risikoexposition. Je gefährdeter die Gebiete durch Naturkatastrophen sind (etwa durch Hochwasser), desto höher sollten auch die Prämien ausfallen (Äquivalenzprinzip). Ein solches Preissetzungsverfahren ermöglicht in der langen Frist risikogerechte Investitionen in Gebäude, indem Zonen mit erhöhter Gefahr nicht mehr besiedelt werden oder nur noch von Personen, die bereit sind die Risiken einzugehen und die entsprechenden Kosten selber zu tragen. Diese zentrale Wirkung der Anpassungsmaßnahme kann ihr Potenzial jedoch nur entfalten, wenn Preise gemäß der Risikoexposition eines Gebäudes gesetzt werden dürfen. Würde hingegen ein Einheitspreis beispielsweise für ein Bundesland oder gar für ganz Deutschland vorgeschrieben, profitieren Eigentümer von stark gefährdeten Gebäuden von zu tiefen Prämien (Verwässerungseffekt der langfristigen und gefährdungsminimierende Siedlungsentwicklung). Um dies zu verhindern und die politische Durchsetzbarkeit von risikogerechten Prämien zu erhöhen, wäre es denkbar, mit fixen Prämienpreisen zu starten und den Versicherern zu erlauben, die Preise über die Zeit der objektiven Risikoprämie anzugleichen.

Weiter erhalten alle Gebäudebesitzenden durch eine Versicherungspflicht einen Versicherungsschutz im Schadensfall. Bei einem solchen entfaltet die Versicherungspflicht dann einen Glättungseffekt auf Einkommen und Vermögen von Haushalten und Unternehmungen. Dies wirkt sich positiv auf Volkswirtschaft und Staatsfinanzen aus, weil einzelne Individuen oder einzelne öffentliche Körperschaften ansonsten plötzlich sehr viel Kapital auf einmal selbst auftreiben müssen. Dies kann ohne Versicherung unnötig existenzbedrohend werden. Durch den alle Gebäude umfassenden Versicherungsschutz

entfallen für den Staat zusätzlich die heute vielfach vorgenommenen Hilfszahlungen im Schadensfall. Diese Beträge wären neu für anderweitige Bereiche frei verwendbar.

**Generelle Auswirkungen**

Die Wirkung einer Versicherungspflicht für Elementarschäden hängt zentral von der Ausgestaltung der Preissetzung ab. Risikogerechte Prämien sind direktes Abbild der Gefahrenexposition eines Gebäudes. Dadurch vermitteln sie Anreize für einen nachhaltigen Siedlungsbau, wodurch künftige Gebäude Naturkatastrophen weniger ausgesetzt sein würden. Mit Durchschnittspreisen für ganze Gebiete wird diese Signalwirkung verwischt und es entstehen Anreize für risikofreudiges Verhalten.

Die Versicherungspflicht für Elementarschäden ist ein Instrument, mit welchem mögliche Schäden durch die Klimaerwärmung privatisiert werden können. Ein durch risikogerechte Prämien gesetzter Preis ermöglicht zudem die Evaluierung weiterer baulicher Anpassungsmaßnahmen: abhängig der Prämienhöhe verändert sich, beispielsweise die Rentabilität einer Hochwasserschutzmaßnahme am Gebäude, mit der die Prämie gesenkt werden kann. Geklärt werden muss jedoch auch der Umgang mit außerordentlichen Ereignissen, die den Rahmen der Versicherungslösung sprengen (normalerweise werden in Versicherungsverträgen maximale Leistungszahlungen festgeschrieben).

### Beurteilung der Maßnahme

Die Maßnahme weist auf zwei Schwierigkeiten im Versicherungsbereich hin. Einerseits bestehen auf Seiten der Versicherer Unsicherheiten bezüglich der „wahren“ Eintretenswahrscheinlichkeiten von Naturkatastrophen. Dies verhindert eine einfache Preissetzung für die Versicherungsprämien. Andererseits sehen sich Individuen zeitlich u.U. weit entfernten Ereignissen gegenüber, deren Risiken auch für die Nachfrager von Versicherungen nur mit Mühe abschätzbar sind.

Genauere Berechnungen sind insbesondere für die Quantifizierung der Kosten notwendig. Die letzten verfügbaren Schätzungen möglicher Elementarschäden durch den Klimawandel liegen einige Jahre zurück und können so die Erkenntnisse aus der Klimaforschung der letzten Jahre noch nicht abbilden. Mittels detaillierterer Annahmen könnten die Kosten der Maßnahme sowohl bezüglich der effektiven Schäden als auch bezüglich der sich daraus für die Versicherten ergebenden Prämien relativ genau beziffert werden. Pilotmäßig ließe sich eine solche Erhebung auch auf kleinerer geografischer Ebene (z.B. Bundesland oder Landkreis) durchführen.

## Tabelle 36: Auswertung der Maßnahme "Neue Versicherungsprodukte – Elementarschadenversicherungspflicht"

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Die Maßnahme zielt auf eine flächendeckende Sicherung der Einkommens- und Vermögensbestände von Gebäudebesitzenden ab, mit Anreizen zur Schadensvermeidung in der langen Frist. |
| **Effektivität** | Mittel | Neben der Verteilung der Schadenskosten auf alle Versicherten setzt die Maßnahme Anreize, langfristig Schäden zu vermeiden. Kurzfristig resultiert ein starker Sensibilisierungseffekt. |
| **Mitnahmeeffekte** | kein | Die Maßnahme sieht keinerlei staatliche Finanzierungen oder Subventionierungen vor. Indirekt können Mitnahmeeffekte in Form von hinfälligen Regulierungskosten auftreten falls sich am Markt auch ohne staatlichen Eingriff eine hohe Versicherungsdichte einstellen würde. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, langfristig | Die sich dem Schadensrisiko anpassenden Versicherungsbeiträge tragen anhaltend zu einer nachhaltigen Siedlungspolitik bei. |
| **Reichweite** | National | Die Maßnahme sollte auf nationaler Ebene umgesetzt werden. |
| **Akzeptanz** | Gering | Angesichts der Nichteinführung in den Jahren 2003/04 eher gering (insb. auch in der Versicherungswirtschaft selber[29]) |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Die Maßnahme entfaltet ihre Wirkung zwar insbesondere bei Eintreten vermehrter Schäden durch den Klimawandel, deckt jedoch zusätzlich auch davon unabhängige Ereignisse wie Erdbeben ab. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Die Maßnahme wirkt bei allen Klimaszenarien. |

[29] Siehe Schwarze & Wagner (2005) S. 14ff.

### 3.3.2 Anpassungsmaßnahme „Kooperationslösung Staat und Versicherungswirtschaft“

Die eingangs skizzierten Erläuterungen sowie die Ausführungen zur Elementarschadenversicherung haben aufgezeigt, dass der Staat in mehrfacher Hinsicht ein relevanter Akteur im Versicherungsmarkt ist:

- Als Regulator, der die Rahmenbedingungen des Versicherungsmarktes wesentlich mitbestimmt,
- Als Akteur, der am Versicherungsmarkt mit eigenen Infrastrukturen und Versicherungsbedürfnissen beträchtlichen Ausmaßes auftritt,
- Als möglicher „lender of last resort“ bei Extremereignissen, dessen Rolle und Haftungsverpflichtungen sowie -erwartungen unklar sind.

Als Regulator nimmt der Staat bereits heute Anliegen der Versicherungswirtschaft (und weiterer Akteure) entgegen. Angesichts der sich abzeichnenden Zunahme von Naturkatastrophen ergeben vermehrter Austausch und Kooperation zwischen öffentlicher Hand und Versicherungswirtschaft Sinn. Im Zentrum steht darüber hinaus die Frage, ob und welche Rolle der Staat als „lender of last resort“ einnimmt und wie diesbezügliche Diskussionspunkte mit den Versicherern geregelt werden können.

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Der Staat und die Versicherungswirtschaft sind über verschiedene Kanäle miteinander verbunden. Einerseits setzt der Staat mit den Rahmenbedingungen die Eckwerte der Versicherungswirtschaft fest. Staatliche Maßnahmen in Bereichen wie Raumplanung oder Infrastrukturbau (Schutzbauten) beeinflussen den Versicherungsmarkt ebenfalls. Über die Versicherungssteuer erhält der Staat zudem direkte Einnahmen aus der Versicherungswirtschaft. Der Staat hat aber auch ein Interesse an Versicherungslösungen, weil diese in der Gesellschaft eine Glättung der Risiken bewirken können, was sich positiv auf die wirtschaftliche Stabilität auswirkt. Zudem müssen versicherte Schäden nicht durch allfällig zugesprochene Staatsgelder bezahlt werden.

Für die Versicherungswirtschaft sind folgende Punkte, welche von Seiten des Staates festzulegen sind, zentral für die Umsetzung ihrer Geschäftsstrategien und somit der Übernahme von Risiken (vgl. Geneva Association 2009, Kap. 7). Sie zeigen, dass es für die Versicherer wichtig ist, klare und langfristig gültige Rahmenbedingungen vorzufinden, auf welche sie ihre Geschäftsmodelle ausrichten können:

- Klare Ziele bezüglich Reduktion der Treibhausgase, möglichst auf internationaler Ebene,
- Ausgearbeitete Adaptationsstrategie (Regulierungen etc.),
- Auslotung möglicher Public-Private-Partnerships im Bereich Versicherung,
- Qualifizierte Schätzungen und Prognosen zu Kosten und Risiken des Klimawandels.

Gemäß diesen Ausführungen sowie unter Berücksichtigung der erwarteten steigenden Schadenszahlen wegen des Klimawandels wird klar, dass eine verstärkte Kooperation

zwischen Staat und Versicherungswirtschaft zentrale Bedeutung zukommen kann. Teilweise findet diese denn auch bereits statt. Folgend werden kurz drei denkbare Bereiche für Zusammenarbeiten und Koordinationslösungen dargestellt:

- Informationsbeschaffung auf der Angebotsseite: Das Erfassen von Daten für die Lokalisierung und Vorhersage von Gefahren durch Naturereignisse ist für die Versicherungswirtschaft essentiell, ebenso für die öffentliche Hand. Heute stützen sich Versicherer für die Risikobeurteilung auf das vom GDV entwickelte Geoinformationssystem ZÜRS (Zonierungssystem für Überschwemmungen, Rückstau und Starkregen). Eine mögliche und auch bereits angedachte Kooperation ist die Zusammenarbeit von Privatwirtschaft und Staat im Bereich der Weiterentwicklung dieses Prognoseinstrumentes.
- Sensibilisierung der Nachfrageseite: Bund und Versicherungswirtschaft haben beide ein Interesse daran, dass die Bevölkerung für mögliche Folgen von Naturereignissen sensibilisiert ist. Informationskampagnen zur Verbesserung der Kenntnisse der Bevölkerung bezüglich Risikoexpositionen gegenüber Naturgefahren und Versicherungsmöglichkeiten bilden deshalb eine weitere Kooperationsmöglichkeit, welche auch bereits angewandt wurde.
- Problematik des „lender of last resort“: In Anbetracht der ungewissen Entwicklung und aufgrund der Erfahrungen aus der Finanzkrise ist es wichtig, diese Fragen frühzeitig zu diskutieren, damit präventiv und im Ereignisfall auf definierte Prozesse und Verfahren abgestützt werden kann. Die Kooperation soll insbesondere darauf hinwirken, genau festzulegen, bis zu welchem Grad die Versicherungswirtschaft die Risiken von Naturkatastrophen abdecken kann, sowie wann und in welchem Rahmen der Staat darüber hinaus als „lender of last resort“ auftreten soll resp. muss.

Im Unterschied zur Versicherungspflicht als Anpassungsmaßnahme steht hier die Zusammenarbeit von Versicherungswirtschaft und öffentlicher Hand im Zentrum. Während die Versicherungspflicht einen konkreten staatlichen Eingriff in den Versicherungsmarkt darstellt, soll die Kooperation vielmehr das Zustandekommen von marktorientierten Angeboten unterstützen und eindeutige Rahmenbedingungen setzen. Es findet kein eigentlicher regulatorischer Eingriff des Staates statt. Klare Eckwerte bei der „lender of last resort“-Thematik dienen der Rechtssicherheit, was für die Planungssicherheit von Versicherern und öffentlicher Hand wichtig ist.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Die Kosten dieser Maßnahme sind nicht direkt oder nur aufwändig erfassbar, da sie in erster Linie aus Transaktions- und Prozesskosten bestehen. Je nach Engagement der öffentlichen Hand fallen bei den diskutierten Möglichkeiten Kosten für die wissenschaftliche Arbeit an der Weiterentwicklung der Prognoseinstrumentarien und Gefahrenkartierung oder für Informationskampagnen an. Im Zentrum steht zudem die Frage nach der Haftung des Staates als „lender of last resort“ sowie die aus dieser Tatsache abgeleiteten Anreizwirkungen auf die Versicherungswirtschaft, weitere Unternehmen und private Haushalte. Kommt dem Staat eine Rolle als „lender of last resort“ zu, verursacht das für ihn ebenfalls Kosten. Diese setzen sich neben dem normalen jährlichen Zinssatz für die zu bezahlenden Geldsummen zusätzlich aus der Risikoprämie zusammen, welche er implizit trägt, weil kein anderer Marktakteur bereit ist in der Situation die hohen Risiken einer

finanziellen Unterstützung einzugehen. Dieser Aufschlag dafür, dass der Staat als einziger bereit ist das Risiko einer Unterstützung der Versicherer einzugehen, lässt sich nicht am Markt direkt ablesen. Der Grund liegt darin, dass in der Situation kein Marktteilnehmer mehr genügend Kapital zur Verfügung hat, um die entstehenden Schäden zu decken. Illustrativ für die dargelegten Mechanismen kann man aber die Entwicklungen am Kapitalmarkt betrachten: In den letzten Monaten waren an den Kapitalmärkten deutliche Veränderungen der Risikoprämien beobachtbar, die sich aus den unterschiedlichen Zinsniveaus zwischen als sicher gehandelten Staatsobligationen von Euro-Ländern und solchen von Euro-Ländern mit prekäreren finanzwirtschaftlichen Kennzahlen zeigten. Diese Zinsdifferenz für Staatsobligationen von z.B. Deutschland und Irland lag Ende 2009 bei 2.5 Prozentpunkten und Ende 2010 bei 6 Prozentpunkten.

**Bewertung der Nutzen**

Die Klärung der Rollen von Staat und Versicherungswirtschaft führt grundsätzlich zu einer Entbündelung von Zuständigkeiten und soll zeigen, wer welche Risiken zu tragen hat. Zusammen mit Kooperationen im Bereich der Informationsbeschaffung resp. der Informationsvermittlung an die Bevölkerung entspricht dies insofern einem Nutzen, als diese Informationen wichtiger Bestandteil der Entscheidungsfindung der relevanten Akteure (öffentliche Hand, Versicherungswirtschaft, Haushalte, Unternehmen) im Sinne von Planungssicherheit sind. Letztlich führt dies zu Entscheidungen und Handlungen, die mit den Risikopräferenzen der Akteure übereinstimmen und deren Konsequenzen bei Schadensfällen allen Akteuren klar sind (Förderung der Eigenverantwortlichkeit). Eine öffentliche Debatte zu solchen Kooperationslösungen bringt den zusätzlichen Vorteil, dass sich bereits in dieser Phase über Staat und Versicherer hinausgehende Kreise mit der Thematik beschäftigen, was ebenso zu einer verbesserten Wahrnehmung der Problematik führen kann.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Kooperation zwischen öffentlicher Hand und privaten Versicherern liefert die Öffentlichkeitskampagne im Bundesland Bayern, die vom Wirtschaftsministerium im April 2008 beschlossen wurde. Angesichts der Dringlichkeit einer vermehrten privaten Vorsorge gegen Folgen von Naturkatastrophen (nur ca. 6% der gegen Elementarschäden versicherbaren Gebäude waren versichert) wurde eine breite Informationskampagne in Zusammenarbeit mit verschiedenen Akteuren aus der Versicherungswirtschaft lanciert. Unter dem Motto „Voraus denken – elementar versichern“ wurde und wird mittels Anzeigen, Flyern und Internetauftritt die Bevölkerung auf die Möglichkeit der Elementarschadenversicherung aufmerksam gemacht.[30] Der Fokus der Kampagne liegt klar bei der Vermittlung von Informationen mit dem Ziel, die gegen Elementarschäden versicherte Gebäudezahl zu steigern. Angaben der Allianz Deutschland AG 100 Tage nach dem Start der Aktion bestätigen ihren Erfolg. Die auf die Kampagne zurückzuführende Nettozuwachsrate der Elementarschadenversicherungen beträgt gemäß der Unternehmung für den erwähnten Zeitraum 7.8% (Allianz 2009). Basierend auf den Erfolgen in Bayern zeichnet sich eine ähnliche Kampagne mit dem Ziel der Sensibilisierung und Aufklärung der Bevölkerung auch in Sachsen ab (GDV 2010b).

[30] Vgl. Bayrische Staatsregierung (2010) sowie www.elementar-versichern.bayern.de.

**Abbildung 11: Informationsanzeige der Kampagne im Bundesland Bayern**

*Quelle: Bayrische Staatsregierung 2010.*

### Generelle Auswirkungen

Kooperationslösungen von Staat und Versicherern können im Bereich der Sensibilisierung und Aufklärung vorsorgend wirken und das Gefahrenbewusstsein sowie die entsprechende Vorsorge bei Haushalten und Unternehmungen fördern.

Wichtig ist darüber hinaus das klare Festsetzen von Leitlinien für die Bewältigung großer Schäden durch Naturkatastrophen. Es muss klar sein, wer wann für welche Schäden und in welcher Höhe aufkommen muss. Es gilt ex-post-Lösungen möglichst zu vermeiden, um für alle Akteure am Markt frühzeitig die richtigen Anreize und Signale zu setzen.

## Beurteilung der Maßnahme

Kooperationen zwischen Staat und Versicherungswirtschaft basieren auf gegenseitigem Interesse. Einerseits ist die Privatwirtschaft an einer einvernehmlichen Zusammenarbeit interessiert, da der Staat als Regulator über die für sie geltenden Rahmenbedingungen befindet. Andererseits ist es im Interesse der öffentlichen Hand, Klarheit über die Haftungskonstellation bei extremen Schadensverhältnissen zu schaffen (welche Kosten werden durch Private getragen und bis zu welcher Höhe?).

Indem beispielsweise durch Informationskampagnen sensibilisiert und aufgeklärt wird, können Kooperationslösungen zudem zu einer generellen Stärkung des Verantwortungsbewusstseins von Haushalten und Unternehmungen beitragen. In diesem Sinne bildet die Zusammenarbeit zwischen öffentlicher Hand und Versicherern eine wichtige Grundlage für den allgemeinen Umgang mit den Gefahren und Risiken des Klimawandels. Es können deshalb bedeutende Wechselwirkungen zu anderen Anpassungsmaßnahmen bestehen. Für eine weitgehend, detaillierte Quantifizierung von Nutzen und Kosten bietet

sich die Informationskampagne in Bayern an. Außerhalb Deutschlands lassen sich allenfalls Erkenntnisse aus dem in Frankreich landesweit zur Anwendung kommenden Nationalen Katastrophensystem (Nat-Cat) ziehen.

### Tabelle 37: Auswertung der Maßnahme „Kooperationslösung Staat und Versicherungswirtschaft“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Sicherung Systemstabilität | Die Maßnahme klärt die zentralen Fragen der Haftungszuständigkeiten im Schadensfall. Sie leistet dadurch einen wichtigen Beitrag zur Systemstabilität. |
| **Effektivität** | gering | Durch die Maßnahme werden keine Schäden vermieden. Sie hat vielmehr einen essenziellen informativen Charakter für die Akteure am Markt. |
| **Mitnahmeeffekte** | gering | Je höher beispielsweise staatliche Ausgaben für Informationskampagnen sind, desto eher bestehen Mitnahmeeffekte. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die „lender of last resort“-Thematik ist tendenziell von einmaliger Wirkung. Informationskampagnen und verbesserte Modelle zur Schadensvorhersage haben jedoch anhaltende Wirkung über sich anpassende Versicherungsbeiträge. |
| **Reichweite** | National | Die Maßnahme sollte auf nationaler Ebene umgesetzt werden. |
| **Akzeptanz** | Unklar bis hoch | Kooperationslösungen für eine erhöhte Sensibilisierung resp. verbesserten Informationsstand der Nachfrage- bzw. Angebotsseite bestehen bereits oder sind angedacht. Für die „lender of last resort“-Thematik ist die Akzeptanz unklar. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Die Klärung der Haftungsfragen bezieht sich auf alle außerordentlichen Schadensereignisse, gegen welche Versicherungen abgeschlossen werden können. Nicht Klima abhängige Ereignisse wie Erdbeben sind durch die Maßnahme ebenfalls abgedeckt. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Die Maßnahme wirkt bei allen Klimaszenarien. |

## 3.4 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz

### 3.4.1 Anpassungsmaßnahme „Küstenschutz durch Deicherhöhung und Sandvorspülung“[31]

#### Beschreibung der Maßnahme

Eine zumindest für Küstenländer wichtige Wirkung des Klimawandels ist der Anstieg des Meeresspiegels. Dieser wird verursacht durch das verstärkte Abschmelzen von Eismassen insbesondere an den Polen, aber auch durch die Ausdehnung des Meerwassers, die ebenfalls ihre Ursache im Temperaturanstieg hat. Je nach verwendetem Klimamodell und zugrunde liegendem Klimaszenario wird für das Jahr 2100 ein Meeresspiegelanstieg zwischen 18 und 59 cm vorausgesagt (IPCC 2007). Im Falle von Stürmen führt dieser Meeresspiegelanstieg zu einem Anstieg der Häufigkeit von Sturmfluten einer bestimmten Schwere (d.h. der Pegel einer 10-jährlichen Sturmflut wird nach dem Anstieg des Meeresspiegels bspw. jedes Jahr erreicht) und zu höheren Sturmfluten mit schwerwiegenderen Konsequenzen. Solche Konsequenzen können im Verlust von Landflächen durch Überschwemmung und Erosion, in Nutzungseinbußen durch Vernässung und Versalzung, in der Beschädigung von Sachgütern (einschließlich der Schutzbauten selbst) und in der Verdrängung menschlicher Aktivitäten mit entsprechenden Produktivitätseinbußen bestehen. Es gibt prinzipiell, ähnlich wie beim Hochwasserschutz, eine Reihe von Möglichkeiten auf diese Herausforderung zu reagieren. Dazu gehören neben dem Schutz vor den schädigenden Wirkungen individuelle Maßnahmen zur Begrenzung der Schäden und Nutzungsänderungen. Allerdings sind die individuellen Maßnahmen teuer und von begrenzter Wirksamkeit und kommen daher nur in Einzelfällen in Frage. Auch die Nutzungsänderungen sind nur unter bestimmten Voraussetzungen relevant. Als wichtigste (und hinsichtlich ihrer Kosten am ehesten quantifizierbare) Maßnahmen bleiben daher gerade für dicht besiedelte und bewirtschaftete Gebiete wie die deutsche Nord- und

[31] Ursprünglich war an dieser Stelle vorgesehen, eine Kosten-Nutzen-Analyse der Erhöhung von Deichen bzw. Dämmen zum Schutz vor steigenden Hochwassern vorzulegen. Davon wurde Abstand genommen, nachdem sich herausstellte, dass die Ergebnisse sehr stark von den jeweils unterstellten Klimaszenarien abhängen. So kamen Ciscar et al. (2009) in der PESETA-Studie gerade für Deutschland zu dem Ergebnis, dass im 2,5°C-Szenario bis 2100 nur in Teilen des Elbegebietes und im Voralpenland mit steigenden, insgesamt für Deutschland aber mit sinkenden hochwasserbedingten Kosten zu rechnen ist. Im Gegensatz dazu zeigten sich im 3,9°C-Szenario Kostenanstiege für das gesamte Rhein- und Elbe- sowie Teile des Donaueinzugsgebietes. Dabei schließen auch die Autoren nicht aus, dass ein Teil der Unterschiede auf Artefakte der zugrunde liegenden Klimamodelle zurückzuführen sein könnte. Insgesamt betragen die Kosten in Deutschland selbst im „teureren“ Szenario etwas mehr als 1 Mrd. Euro pro Jahr, liegen also kostenmäßig im Mittelfeld der betrachteten Maßnahmen. Als weiteres Argument diese Maßnahme nicht genauer zu betrachten kam schließlich hinzu, dass in der Literatur keine Daten zur Berechnung der Kosten der Anpassungsmaßnahmen verfügbar waren.

Ostseeküste der Bau bzw. die Verstärkung von Abwehrbauten (Deiche) sowie Sandvorspülungen zur Vermeidung von Landverlusten durch Erosion (Klein et al. 2001).

### Kosten- und Nutzenerfassung

Der technische Bericht der PESETA-Studie zum Einfluss des Klimawandels auf den Küstenschutz (Richards & Nicholls 2009) ist nicht nur die einzige Quelle mit einer detaillierten Auflistung der Kosten des Klimawandels und entsprechender Anpassungsmaßnahmen in diesem Bereich. Es ist außerdem die einzige Studie, die die Herkunft der verwendeten Daten offenlegt und in diesem Zusammenhang auch die Funktionsweise des Modells erklärt, mit dessen Hilfe ein Großteil der Daten generiert wurde. Die Studie macht detaillierte Angaben zu allen EU-Staaten, die mit einer Küste an das Meer grenzen. Es werden verschiedene sozioökonomische Szenarien auf der Basis unterschiedlicher Klimamodelle untersucht, die hinsichtlich des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs bis 2100 von 9 bis 88 Zentimeter reichen und damit eine größere Unsicherheitsspanne berücksichtigen als die IPCC-Studie (vgl. „Beschreibung der Maßnahme“). Zwecks Vergleichsmöglichkeit mit den anderen Klimaanpassungsmaßnahmen betrachten wir das Szenario A2 auf der Basis des Klimamodells ECHAM4 mit einem mittleren Meeresspiegelanstieg von 43,8 Zentimeter bis 2100. Die wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Küstenschutz sowie die Kosten entsprechender Anpassungsmaßnahmen wurden von Richards und Nicholls (2009) berechnet und sind in Tabelle 38 aufgeführt.

**Tabelle 38: Durch den Klimawandel verursachte wirtschaftliche Schäden im Bereich Küstenschutz und Kosten dagegen gerichteter Anpassungsmaßnahmen (in Mio. Euro/Jahr) bis 2085 im Szenario A2 bei mittlerem Meeresspiegelanstieg für Deutschland**

| | Schadens-kosten[a] ohne Anpassung | Schadens-kosten[a] mit Anpassung | Vermiedene Schadens-kosten | Kosten der Anpassung |
|---|---|---|---|---|
| Überflutungskosten (Meer) | 284,1 | 14,0 | 270,1 | |
| **Kosten von Deichen (Meer)** | | | | **33,3** |
| Kosten der Meerwasserintrusion[b] | (47,5) | (47,5) | (0) | |
| Überflutungskosten (Flussmünd.) | 1,7 | 0 | 1,7 | |
| **Kosten von Deichen (Flussmünd.)** | | | | **1,6** |
| Kosten des Landflächenverlustes | 9,6 | 9,4 | 0,2 | |
| **Kosten der Sandvorspülungen** | | | | **75,8** |
| **Summe der Schadenskosten** | **295,4** | **23,4** | **272,0** | |
| **Summe der Anpassungskosten** | | | | **110,7** |

[a] Um die durch den Klimawandel – hier also den Meeresspiegelanstieg – verursachten Kosten getrennt auszuweisen, werden die Kosten im Szenario A2 *ohne* Meeresspiegelanstieg von den insgesamt erwarteten Kosten subtrahiert. Die aufgeführten Schadenskosten umfassen die unmittelbaren Schäden durch eine allfällige Überflutung, den Wert des verlorenen Landes und Kosten von Landnutzungsänderungen, die durch Erosion und Überflutungen dauerhaft verursacht werden.

[b] Die Meerwasserintrusion ist zwar eine Folge des Klimawandels, wird aber durch die Anpassungsmaßnahmen nicht beeinflusst und daher in der Kostensumme nicht berücksichtigt.

### Beurteilung der Maßnahme

Wie Tabelle 38 zu entnehmen ist, beträgt das Nutzen-zu-Kosten-Verhältnis der hier untersuchten Anpassungsmaßnahmen im Bereich Küstenschutz 2,46:1, ist also eindeutig positiv. Ein Vergleich mit den Anpassungs- und vermiedenen Schadenskosten in dem alternativen Szenario B2 und bei jeweils höheren und niedrigeren Meeresspiegelanstiegen ergab, dass in all diesen Fällen die Nutzen-zu-Kosten-Verhältnisse größer (meist bis 6:1) waren als in dem hier betrachteten. Das heißt, dass das hier gefundene Ergebnis hinsichtlich seines positiven Nutzen-zu-Kosten-Verhältnisses als robust gelten kann. Einschränkend ist allerdings darauf hinzuweisen, dass alle Ergebnisse aus einer PESETA-Studie stammen, in dem Kosten und Nutzen des Küstenschutzes mit Hilfe des Modells DIVA ermittelt wurden. Eine Einordnung dieser Modellergebnisse in Relation zu alternativen Modellergebnissen ist wegen fehlender Daten nicht möglich.

Auf den ersten Blick scheint die Verstärkung der Deiche ein noch besseres Nutzen-Kosten-Verhältnis aufzuweisen (8,1:1), wogegen die Sandvorspülungen deutlich teurer sind als die damit vermiedenen Landflächenverluste. Es muss hier aber darauf hingewiesen werden, dass Sandvorspülungen oft auch dem Schutz von Deichen dienen, die andernfalls durch Sturmfluten stärker geschädigt werden könnten. Von daher sind die beiden Teilmaßnahmen als Gesamtpaket zu verstehen.

Es ist ebenfalls zu beachten, dass die angegebenen Zahlen sich auf den Zielzeitraum 2070 bis 2100 (Mittelwert 2085) beziehen. Bis zum Jahr 2050 wäre unter gleichen Voraussetzungen mit einem knapp halb so starken Meeresspiegelanstieg zu rechnen. Da die zu erwartenden Schäden stark überproportional zum Meeresspiegelanstieg ansteigen, besteht daher bis zu diesem Zeitpunkt kaum Anpassungsbedarf, der über die Maßnahmen der Deicherhaltung und des Küstenschutzes, der sowieso betrieben wird, hinausgeht. Es sollte aber auf jeden Fall ab sofort darauf geachtet werden, dass im Falle der Grundsanierung vorhandener Deiche Vorkehrungen getroffen werden, die eine spätere Erhöhung des Deichkamms in dem Umfang, in dem es der Meeresspiegelanstieg erfordert, erleichtert.

Der Küstenschutz ist traditionell eine Gemeinschaftsaufgabe der Küstenregionen (heute: Küstenländer), die dem Schutz menschlichen Lebens und der Sicherung der Lebensgrundlagen dient. Die Gemeinschaft bestimmt auch darüber, inwieweit die Sicherungsanforderungen aufgrund des Klimawandels verschärft werden müssen. Da die Kosten der Schutzmaßnahmen außerdem von allen Bewohnern der Küstenländer bezahlt werden müssen, ist nicht von Mitnahmeeffekten auszugehen.

### Tabelle 39: Auswertung der Maßnahme „Küstenschutz durch Deicherhöhung und Sandvorspülung“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, absoluter Schutzgedanke | Schutz menschlichen Lebens und Sicherung der Lebensgrundlage stellen absolutes Schutzgut dar. |
| **Effektivität** | Mittel bis hoch | Der Küstenschutz kann nicht alle, aber den größten Teil möglicher Schäden abwehren. Dabei ist der Nutzen deutlich höher als die Kosten. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Da der Küstenschutz eine von Allen finanzierte Gemeinschaftsaufgabe ist, ist mit Mitnahmeeffekten nicht zu rechnen. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Wegen der Höhe der Kosten sind die Entscheidungsprozesse, die zu Anpassungsmaßnahmen führen, recht langwierig. Zur Nutzung von Zeitfenster (Neubau und Sanierung) können vorbereitende Maßnahmen ergriffen werden, die weniger kosten und daher leichter umsetzbar sind. |
| **Reichweite** | Regional | Küstenschutz liegt in der Zuständigkeit der Küsten-Bundesländer. Finanzierung auch über den Länderfinanzausgleich. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Der Küstenschutz hat eine lange Tradition und wird von keiner Seite in Frage gestellt. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Verstärkte Küstenschutzmaßnahmen bedeuten im Fall des Ausbleibens des Klimawandels eine Verbesserung des Schutzes. Mögliche versunkene Kosten können außerdem dadurch gesenkt werden, dass vorbereitende Maßnahmen getroffen werden, die bspw. bei Bedarf eine Erhöhung bestehender Deiche erlauben. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Sowohl Kosten als auch Nutzen des Küstenschutzes steigen überproportional zum Anstieg des Meeresspiegels. |

### 3.4.2 Anpassungsmaßnahme „Vermeidung von Abwassereinleitungen in Gewässer durch zusätzliche Regenüberlaufbecken“

#### Beschreibung der Maßnahme

Häufigere oder intensivere Extremniederschläge, wie sie für den Klimawandel vorhergesagt werden, führen in der Wasserwirtschaft von der Hochwasserabwehr abgesehen vor allem zu Problemen im Rahmen der Abwasserbeseitigung. Besonders im Falle der weit verbreiteten Mischkanalisation, wo Schmutz- und Niederschlagswasser in einem gemeinsamen Kanalnetz erfasst und einer Kläranlage zugeführt werden, kommt es im Zuge länger dauernder und/oder intensiverer Niederschläge zu einer Überschreitung der Durchflusskapazität der Kanalisation. Damit unter diesen Umständen das überschüssige (Misch-) Abwasser nicht durch die Kanalschächte entweicht und die Umgebung überflutet, wird es planmäßig über sogenannte Entlastungsbauwerke „abgeschlagen“. Das Abwasser wird in diesen Fällen in sogenannte Regenüberlaufbecken (RÜB) geleitet, aus denen es nach dem Ende des Niederschlagsereignisses wieder in die Kanalisation zurückgeleitet und der Kläranlage zugeführt werden kann. Erst wenn auch die Kapazität der RÜB erschöpft ist, kann unbehandeltes Abwasser in die Umwelt entweichen, wobei es meist dem nächstgelegenen Gewässer zugeführt wird.

Um zu verhindern, dass aufgrund stärkerer Niederschläge immer mehr Abwasser in die Umwelt gelangt und dort Schäden hervorruft, kann mit Hilfe zusätzlicher RÜB-Kapazitäten versucht werden, die Menge des in die Umwelt gelangenden Abwassers nicht ansteigen zu lassen, sondern in etwa konstant zu halten.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

Dass sich in Deutschland die durchschnittlichen Niederschlagsmengen im Zuge des Klimawandels vom Sommer- in das Winterhalbjahr verschieben werden, gilt als sicher. Wesentlich unsicherer sind demgegenüber Aussagen zur Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen. In einem gemeinsamen Projekt haben nun der Deutsche Wetterdienst, das Umweltbundesamt, das Technische Hilfswerk und das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe herausgefunden, dass die Häufigkeit von Extremniederschlägen vor allem im Winter ab dem Jahr 2040 deutlich zunehmen wird. Bis zum Jahr 2100 wird die Niederschlagshäufigkeit in der norddeutschen Küstenregion um bis zu 50 % zunehmen, wogegen im Voralpenland kaum Veränderungen erwartet werden (Becker 2011). Interessanter noch sind im Hinblick auf die Überlastung von Siedlungsentwässerungsanlagen Aussagen über die Intensität von Extremniederschlägen. Hier zeigen Staufer et al. (2010), dass im Hinblick auf die für die Bemessung der Kanalisation relevanten 2- bis 5-jährlichen Ereignisse mit einer Zunahme der Regenmenge um mindestens 20 % zu rechnen ist. Wir gehen daher im vorliegenden Fallbeispiel von der Annahme aus, dass die Häufigkeit und Intensität der Starkniederschläge sich in Zukunft so verändern wird, dass um 20 % vergrößerte RÜB erforderlich sind, um die in die Umwelt entlassenen Abwassermengen konstant zu halten und das gegenwärtige Schutzniveau für die Umwelt aufrecht zu erhalten. Wir werden in nächsten Abschnitt untersuchen, inwieweit

sich das Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse verändert, wenn von dieser Annahme abgewichen wird.

In Deutschland gibt es dem Statistischen Bundesamt (DeStatis 2009) zufolge 23.772 RÜB mit einem Gesamtvolumen von 15,15 Mio. Kubikmetern. 20 % davon sind 3,03 Mio. Kubikmeter. Unterstellt man spezifische Baukosten in Höhe von 750 Euro pro Kubikmeter RÜB-Volumen (Interwies et al. 2004), dann belaufen sich die Gesamtbaukosten für die zusätzlich erforderliche Kapazität auf 2,27 Mrd. Euro. Bei linearer Abschreibung über 30 Jahre ergeben sich jährliche Kosten in Höhe von 75,8 Mio. Euro, bei Anwendung der Barwertmethode und unter Berücksichtigung eines Zinses von 1,5 % sogar 93,9 Mio. Euro.

Die Bezifferung des Nutzens dieser Maßnahme erfolgt auf der Basis der vermiedenen Schäden. Zur Monetarisierung des durch die Einleitung von Abwasser in die Umwelt entstehenden Schadens werden die Kosten bestimmt, die aufzuwenden wären, um das ohne Klimaanpassungsmaßnahme zusätzlich in die Umwelt entlassene Abwasser wieder unschädlich zu machen. Dazu werden zunächst die Abwassermengen berechnet, die pro Jahr aus den RÜB in die Umwelt gelangen (Hahn et al. 2000). Aktuell sind das 227,3 Mio. Kubikmeter, bei der angenommenen Zunahme der Niederschlagsintensität wären es 272,8 Mio. Kubikmeter – mithin eine Differenz von 45,5 Mio. Kubikmeter. Hinsichtlich der Verschmutzung dieses Abwassers wird berücksichtigt, dass das eigentliche Schmutzwasser aufgrund des den Überlauf verursachenden Niederschlags mit der gleichen Menge Niederschlags- (und Fremd-)wasser verdünnt ist. Um die Schädlichkeit dieser Abwassermenge zu bewerten, wählen wir methodisch den Ansatz den Aufwand zu beziffern, der betrieben werden muss um die drohenden Schäden zu vermeiden. Dabei wenden wir die Methode von Hoekstra et al. (2009) an, wonach der Wert des Volumens an Rohwasser zu berechnen ist, das notwendig wäre, um das aus den RÜB zusätzlich abgeschiedene Abwasser so zu verdünnen, dass es nicht mehr umweltschädlich ist. Wir gehen dabei (in Anlehnung an Hoekstra et al. 2009) davon aus, dass letzteres der Fall ist, wenn für den biologischen Sauerstoffbedarf (BSB) und die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor die maximal zulässigen Ablaufkonzentrationen von Kläranlagen der Größenklasse 5 eingehalten werden. Diese betragen 15, 13 bzw. 1 mg pro Liter. Im (mit Regenwasser verdünnten) Abwasser betragen die Konzentrationen hingegen im Durchschnitt 227, 41 bzw. 7,3 mg pro Liter. Die stärkste Verdünnung zur Erreichung des Grenzwertes ist für den BSB erforderlich – Faktor 15,1. Das heißt, das im Falle von Starkniederschlägen in die Umwelt gelangende Abwasser müsste im Durchschnitt mit der 15,1-fachen Menge sauberen Rohwassers (z.B. Grundwasser) verdünnt werden, damit davon keine Schadwirkung mehr ausgeht. Daraus resultiert, dass jedes Jahr 688 Mio. Kubikmeter Rohwasser notwendig wären, um das zusätzlich in die Umwelt entlassene Abwasser weitgehend unschädlich zu machen.[32] Bewertet mit 0,045 Euro pro Kubikmeter entsprechend einem weit verbreiteten Ansatz für das Wasserentnahmeentgelt resultiert daraus ein (vermiedener) Schaden (= Nutzen) in Höhe von 31,0 Mio. Euro pro Jahr.

[32] Es ist klar, dass die Schmutz- bzw. Nährstofffracht durch die Verdünnung nicht reduziert und nur teilweise (kurzfristig) unschädlich gemacht wird. Längerfristig kann es bspw. zur Ablagerung im und späteren Freisetzung aus dem Sediment kommen. Es geht hier aber nicht darum, diese Verdünnung tatsächlich durchzuführen, sondern die Kosten ihrer Durchführung als *Mindest*maß für den zu tätigenden Aufwand anzusehen.

## Beurteilung der Maßnahme

Der Vergleich von Kosten und Nutzen der Erweiterung der Kapazität von RÜB als Reaktion auf häufigere oder verstärkte Starkniederschläge zeigt, dass der vermiedene Schaden um den Faktor 0,41 bzw. 0,33 kleiner ist als die Kosten. Dabei sind die Unsicherheiten auf Seiten der vermiedenen Schäden größer als auf Seiten der Kosten. Bspw. könnte das Argument geltend gemacht werden, dass die Ablaufgrenzwerte von Kläranlagen der Größenklasse 5 als Referenz nicht geeignet sind, weil sie auf die Konzentration bestimmter Stoffe Bezug nimmt, nicht jedoch auf die emittierten Stoffmengen (Fracht), die im Falle des Kläranlagenablaufs entsprechend reduziert ist, im Falle der hypothetischen Verdünnung aber unverändert bleibt. Dementsprechend wäre der durch das Überlaufen der RÜB entstehende tatsächliche Schaden größer als der von uns berechnete. Diesem Argument kann entgegen gehalten werden, dass die tatsächlichen Konzentrationen der Schadstoffe, die mit dem Abwasser in die Umwelt gelangen, wahrscheinlich niedriger sind als von uns angenommen, weil RÜB meist so konstruiert sind, dass der erste Schwall besonders verschmutzten Schmutzwassers im RÜB verbleibt, wogegen das letztlich in die Umwelt gelangende Abwasser durch den Niederschlag deutlich verdünnt ist. Beide aufgeführten Effekte tendieren dazu sich gegenseitig aufzuheben. Bleibt noch die Frage, ob die angenommene Erweiterung der RÜB-Kapazität um 20 % angemessen ist bzw. wie sensibel die Kosten- und Nutzenzahlen auf eine Veränderung dieses Prozentsatzes reagieren. Auf den ersten Blick führt die Veränderung bei dieser Annahme zu einer proportionalen Veränderung sowohl des hinzuzubauenden RÜB-Volumens als auch des damit vermeidbaren Abwasserabschlag-volumens. Das Zubauvolumen schlägt sich dem von uns gewählten Ansatz zufolge in einem entsprechenden proportionalen Anstieg der Kosten nieder, wobei in der Realität wegen zunehmender technischer Probleme und zunehmendem Platzmangel im Bestand eher mit überproportional steigenden Kosten zu rechnen ist. Auf Seiten der vermiedenen Schäden ist demgegenüber in der Realität eher mit einem unterproportionalen Anstieg zu rechnen, da die Konzentration der Schadstoffe im in die Umwelt gelangenden Abwasser aufgrund der Verdünnung mit weniger verschmutztem Niederschlagswasser mit zunehmendem Volumen geringer wird. Das heißt die Kosten des RÜB-Zubaus steigen stärker bzw. sinken langsamer als der unterstellte Prozentsatz, wogegen der Nutzen etwas weniger ansteigt. Unter der Annahme, dass bei einem nur 10-%igen Anstieg der Niederschlagsintensität die spezifischen RÜB-Kosten 10 % tiefer und die vermiedenen Schäden pro Kubikmeter Abwasser 20 % höher liegen, beträgt das Nutzen-zu-Kosten-Verhältnis 0,55 bzw. 0,44. Nehmen wir dagegen bei einer 30-%igen Zunahme der Niederschlagsintensität 20 % höhere spezifische Kosten und 30 % geringere vermiedene Schäden pro Kubikmeter an, dann läge das Verhältnis bei 0,24 bzw. 0,19. Folglich ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis für kleinere Zubauvolumina deutlich günstiger als für größere. Das bedeutet auch, dass die Wirksamkeit dieser Maßnahme gerade dann nachlässt, wenn sie am dringendsten gebraucht wird.

Grundsätzlich obliegt dem Staat gemäß Wasserhaushaltsgesetz die Fürsorgepflicht für die Gesundheit der Bürger und den Schutz der Umwelt im Bereich der Abwasserentsorgung. Die Details werden auf Länderebene in entsprechenden Verordnungen oder hinsichtlich der technischen Ausführungsdetails durch Standards („Arbeitsblätter“) geregelt, die von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA; früher: Abwassertechnische Vereinigung, ATV) entwickelt werden. Dabei ist die Einrichtung von RÜB grundsätzlich vorgeschrieben, wenn die Kanalisation nicht das gesamte Mischabwasser ableiten kann. In welchem Umfang überschüssiges Mischabwasser aufzufangen ist, d.h. wie die RÜB zu bemessen sind, wird von der DWA u.a. aufgrund von

Kosten-Nutzenerwägungen bestimmt. Insofern müsste auch die DWA das entsprechende Arbeitsblatt (A-128) ändern, um den klimabedingten Veränderungen seitens der Niederschläge Rechnung zu tragen. Dabei gibt es keine Mitnahmeeffekte, da die Durchführung auf Kreis- bzw. Gemeindeebene ausschließlich aufgrund der einschlägigen Vorschriften erfolgt.

**Tabelle 40: Auswertung der Maßnahme „Vermeidung von Abwassereinleitungen in Gewässer durch zusätzliche Regenüberlaufbecken“**

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Der Schutz der Umwelt stellt zwar ein hochrangiges Schutzgut dar, der aber durch die in Frage stehende Klimawirkung nicht gravierend beeinflusst wird. |
| **Effektivität** | Gering | Die Wirksamkeit von RÜB ist immer teilweise. Das Verhältnis von Wirkung zu Kosten verschlechtert sich mit zunehmender Größe der RÜB. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Der Bau von RÜB wird ausschließlich von öffentlichen Stellen initiiert und auch finanziert. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Die Maßnahme ist eine bauliche Maßnahme, die nur direkt auf das Auffangen von Regenwasser im Fall des Schadensereignisses ausgelegt ist. Weitere strukturelle Veränderungen werden nicht angestoßen. |
| **Reichweite** | National | Die Abwasserbehandlung ist zwar vor allem Sache der Länder, Kreise und Gemeinden. Die der erforderlichen RÜB-Volumina würde aber durch die DWA (national) getroffen. |
| **Akzeptanz** | Gering/Mittel | Die Kosten zusätzlicher RÜB würden unmittelbar auf die Abwassergebühren umgelegt. Zumindest ohne Darstellung der Gründe ist die Steigerung dieser Gebühren aber nicht populär. |
| **Regret/No-regret** | Low regret | Die Erweiterung der RÜB-Kapazitäten dient auch bei unveränderten Niederschlägen dem Schadstoffrückhalt, wenn auch in geringerem Umfang. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Bei Szenarien mit größerer Häufigkeit bzw. Intensität von Niederschlägen nimmt die absolute Wirksamkeit zu, die relative Wirksamkeit (Anteil an der gesamten Umweltbelastung) dagegen ab. |

### 3.4.3 Vertiefung: Anpassungsmaßnahme „Anpassung der Kläranlagenablauf-qualität an die reduzierte Wasserführung von Gewässern“

#### Beschreibung der Maßnahme

Die Grenzwerte für die Konzentrationen von Restverunreinigungen im Ablauf von Kläranlagen sind i.d.R. so festgelegt, dass in den Einleitgewässern keine ökologischen Schäden auftreten können und die Gesundheit von Menschen, die mit dem Wasser in Kontakt kommen, nicht gefährdet ist. Dies gilt für den Regelfall, in dem die geführte Wassermenge erheblich größer ist als das Ablaufvolumen. Im Umfeld von Gewässern, die regelmäßig relativ zum Einleiter wenig Wasser führen, gelten von vorneherein strengere Grenzwerte. Führt ein Einleitgewässer nur vorübergehend, z.B. im Zuge einer sommerlichen Trockenperiode wenig Wasser, so wird die stärkere Belastung in Kauf genommen.

Angesichts des Klimawandels stellt sich die Frage, ob sich im Zuge der Erwärmung Perioden niedriger Wasserführung häufen oder intensivieren werden. Sollte dies der Fall sein, so ist zu überprüfen, ob eine Anpassung der Ablaufgrenzwerte stattfinden muss. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor, die zu einer Eutrophierung, d.h. zum vermehrten Wachstum von Algen führen können. Die Eutrophierung und das damit einhergehende Algenwachstum sind gerade in Kombination mit den höheren Sommertemperaturen für das Ökosystem des Flusses besonders schädlich, da bei sowieso schon niedrigem Sauerstoffgehalt Fäulnisprozessen Vorschub geleistet wird. Im Extremfall kann das Gewässer „umkippen“.

In der nachfolgenden Kosten-Nutzen-Analyse wird unterstellt, dass zumindest eine Verschlechterung der aktuellen Situation durch den bevorstehenden Klimawandel dadurch verhindert wird, dass die Reinigungswirkung der Kläranlagen genau in dem Umfang intensiviert wird wie die Niedrigwasserstände der Flüsse infolge des Klimawandels weiter absinken. Dadurch würden sich zumindest die Nährstoffkonzentrationen in den Flüssen nicht weiter erhöhen. Zusätzliche (negative) Effekte durch ansteigende Wassertemperaturen, denen durch eine zusätzliche Nährstoffkonzentrationssenkung entgegengewirkt werden könnte, werden in Ermangelung der notwendigen Daten nicht betrachtet.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

**Kostenschätzung**

Soll berechnet werden, um wie viel sich die Abwasserreinigung verteuert, wenn einer Absenkung der Wasserführung der Einleitgewässer von Kläranlagen durch eine entsprechende Ertüchtigung der Reinigungsprozesse Rechnung getragen werden soll, dann besteht der erste Schritt darin festzulegen, von welchem Prozentsatz der Senkung der Wasserführung tatsächlich ausgegangen werden kann. Hennegriff et al. (2008) haben mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells LARSIM (Bremicker 2000) und auf der Basis des globalen Klimaszenarios B2/ECHAM4 und entsprechenden Niederschlagsdaten, die mit Hilfe des statistischen, wetterlagenbasierten Klimamodells WETTREG regionalisiert wurden, die Veränderungen der mittleren Niedrigwasserabflüsse und der Häufigkeit und Dauer von Niedrigwasserperioden in Baden-Württemberg bestimmt. Bis zum Jahr 2050 ergeben sich je

nach Teilregion für die Monate Juli bis September klimawandelbedingte Veränderungen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MNQ(m)) von -3 bis -30 %, im Durchschnitt -14 %. Diese Abnahmen sind deutlich stärker als die für das gesamte Sommerhalbjahr vorausgesagten Veränderungen (-23 bis +20 %), die im Durchschnitt nur auf eine geringe Abnahme im niedrigen einstelligen Prozentbereich hindeuten, und stehen in deutlichem Gegensatz zu den Zunahmen im Winterhalbjahr (zwischen +5 und +53 %). Etwas stärker als der durch den Klimawandel verursachten Rückgang der mittleren Niedrigwasserabflüsse am Oberrhein in den Monaten Juli bis September ist mit -23 % der Rückgang der mittleren Abflüsse der Elbe im August, die Kaltofen et al. (2011) auf Basis des Wasserbewirtschaftungsmodells WBalMo und des Klimamodells STAR bis zum Jahr 2050 vorausberechnet haben. Dieser relative Rückgang liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie die relativen Abflussrückgänge bei ausgeprägten ($NQ_{20}$) und extremen Niedrigwasserverhältnissen ($NQ_{100}$), die jeweils 20 % betragen. Insgesamt kann daraus abgeleitet werden, dass die vor allem in den Sommermonaten auftretenden niedrigeren Wasserstände der großen Flüsse durch den Klimawandel noch weiter sinken werden. Diese Senkung wird je nach Region sehr unterschiedlich ausfallen und von leichten bis sehr deutlichen Rückgängen reichen. Im Durchschnitt kann jedoch bis 2050 von Rückgängen zwischen 15 und 20 % ausgegangen werden. Wir werden die folgende Kosten-Nutzenanalyse auf der Basis eines Rückgangs um 20 % durchführen. Um der Unsicherheit bei der Bestimmung des relativen Rückgangs Rechnung zu tragen, werden wir aber in der anschließenden Bewertung eine Sensitivitätsanalyse durchführen und betrachten, wie sich ein Abweichen von dieser 20 %-Marke auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis auswirkt.

Soll im Zuge eines Rückgangs des Abflussvolumens eines Fließgewässers die Wasserqualität konstant gehalten werden, dann muss auch die Menge eingeleiteter Verunreinigungen in entsprechendem Umfang reduziert werden. Der Handlungsbedarf orientiert sich dabei einerseits an den Zeitabschnitten, in denen die relativen Abflussvolumina besonders gering sind, da in diesen Fällen die aus der Einleitung resultierenden Schadstoffkonzentrationen am höchsten sind. Andererseits an den Perioden, in denen die Abflussraten in Zukunft am deutlichsten zurückgehen werden, weil sich hier der ökologische Zustand des Flusses am ehesten verschlechtert. Da im Jahresverlauf beide Phasen (d.h. Monate geringen Abflusses und weiter sinkender Abflüsse) weitgehend übereinstimmen, ist es offensichtlich, dass die Kosten einer Anpassung an den Klimawandel sich im vorliegenden Fall auf Maßnahmen beziehen müssen, die eine über die aktuellen Grenzwerte hinaus gehende Senkung der Emissionen von Kläranlagen um 20 % zur Folge haben. Für die im vorliegenden Kontext zu betrachtenden Wasserverunreinigungen, die Nährstoffe Gesamtstickstoff ($N_{ges}$) und Gesamtphosphat ($P_{ges}$), existieren gegenwärtig Grenzwerte für die maximal zulässigen Ablaufkonzentrationen, die von der Größe der jeweiligen Kläranlage abhängig sind. Sehr große Kläranlagen (Größenklasse 5: > 100.000 EW)[33] müssen niedrigere Grenzwerte einhalten als große Kläranlagen (GK 4: > 10.000 bis

[33] EW steht für Einwohnerwerte und quantifiziert die Schmutzfracht im Abwasser als Summe der angeschlossenen Einwohner und der angeschlossenen Industrie- und Gewerbebetriebe. Die Schmutzfracht des von Industrie und Gewerbe der Kläranlage zugeführten Abwassers wird dabei anhand durchschnittlicher einwohnerspezifischer BSB-, N- oder P-Frachten in sogenannte Einwohnergleichwerte (EWG) umgerechnet und der Schmutzfracht der angeschlossenen Einwohnerzahl hinzugerechnet. BSB bezeichnet den biologischen Sauerstoffbedarf und ist ein Maß für den Gehalt an (biologisch abbaubaren) organischen Substanzen.

100.000 EW), weil die anspruchsvolleren Technologien im größeren Stil günstiger zu betreiben sind und damit die Kostenbelastung für die Betreiber der Kläranlagen und damit die Gebühren zahlenden Haushalte möglichst gering gehalten werden kann. Aus dem gleichen Grund müssen kleinere Kläranlagen (GK 1 bis 3: <= 10.000 EW) i.d.R. keine oder nur in geringerem Umfang Nährstoffeliminierung durchführen (vgl. Tabelle 41).

**Tabelle 41: Grenzwerte der Nährstoffkonzentration im Ablauf von Kläranlagen aktuell und zur Erreichung einer Reduktion der Nährstofffrachten um 20 %**

| Größenklasse der Kläranlage | GK 1 | | GK 2 | | GK 3 | | GK 4 | | GK 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Regulierter Nährstoff | $N_{ges}$ | $P_{inorg}$ | $N_{ges}$ | $P_{inorg}$ | $N_{ges}$ | $P_{inorg}$ | $N_{ges}$ | $P_{inorg}$ | $N_{ges}$ | $P_{inorg}$ |
| Aktuelle Grenzwerte [mg/L] | -- | -- | -- | -- | 40 | -- | 18 | 2 | 13 | 1 |
| Angepasste Grenzwerte [mg/L] | 40 | 3,5 | 40 | 3,5 | 40 | 2 | 11 | 1 | 9 | 1 |

Die Berechnung der Kosten für die Reduktion der Nährstofffrachten im Kläranlagenablauf erfolgt mit Hilfe des Modells INNUWIM, das im GLOWA-Elbe-Projekt für die Bewertung von Maßnahmen zur Reduktion der kläranlagenbedingten Nährstoffemissionen im Elbegebiet verwendet wurde (Sartorius et al. 2011). In diesem Modell sind alle Kläranlagen des deutschen Teils des Elbeeinzugsgebietes mit den relevanten Betriebsparametern (u.a Ausbaugröße, zufließendes Abwasservolumen einschließlich Nährstoffmengen) und ihrem Einleitpunkt in das Flusssystem erfasst. Außerdem bildet das Modell die verschiedenen technischen Ansätze zur Reduktion der Nährstoffkonzentrationen und die dadurch verursachten Kosten ab. Es ist also möglich, nach Größenklasse differenziert gegenüber dem Status quo verschärfte Grenzwerte für die Kläranlagen einzugeben. Das Modell INNUWIM wählt dann die jeweils günstigste (Kombination von) Reduktionstechnologie(n), bestimmt das Ausmaß der Emissionsreduktion sowie die Kosten für den Einbau und Betrieb der entsprechenden Prozesstechnik.

Die Technologien, die zwecks Reduktion der Nährstoffemissionen über den Kläranlagenablauf zum Einsatz kommen, werden im Folgenden dargestellt. Der einfachste Technikansatz zur Reduktion der P-Frachten im Kläranlagenablauf ist die Simultanfällung, bei der dem zu klärenden Abwasser i.d.R. Eisenchlorid hinzu dosiert wird, woraufhin das im Abwasser enthaltene Phosphat als Eisenphosphat ausfällt und im Absetzbecken mit dem Klärschlamm aus dem Abwasser- bzw. Ablaufstrom entfernt wird. Mit diesem Ansatz sind Ablaufkonzentrationen von 2 mg P/L, bei Kläranlagen der Größenklasse 5 sogar 1 mg P/L sicher einhaltbar. Sollen geringere P-Konzentrationen (bis 0,5 mg P/L) im Ablauf erreicht werden, kommt die Flockungsfiltration zum Einsatz, bei der durch Zugabe eines Flockungsmittels die Fällungspartikel vergrößert und damit das Ausfällen und Absetzen des Eisenphosphats beschleunigt bzw. die Filtration überhaupt erst ermöglicht wird. Stickstoff liegt im Abwasser großenteils als $NH_4$-Stickstoff, d.h. in reduzierter Form vor. Durch die Behandlung des Abwassers mittels Nitrifikation werden diese Stickstoffverbindungen in weniger schädliches Nitrat umgewandelt, wobei gleichzeitig die $N_{ges}$-Konzentration auf unter 40 mg N/L gesenkt wird. Dieses Verfahren ist Standard für Kläranlagen der Größenklassen 3 bis 5, wird in kleineren Kläranlagen aber noch nicht standardmäßig eingesetzt. Soll die $N_{ges}$-Konzentration weiter gesenkt werden, muss eine Denitrifikation durchgeführt werden, bei der das Nitrat wieder zu Stickstoff reduziert wird, der als Gas in die Atmosphäre entweicht. Um eine Nitrifikation und ggf. Denitrifikation durchzuführen müssen als kostenmäßig wichtigste Verfahrensänderung die Becken vergrößert werden, in denen die biologische Abwasserbehandlung stattfindet, um die erforderliche Steigerung des Schlammalters zu

ermöglichen. Die Kosten aller genannten Verfahren sind, teilweise nach Größenklassen differenziert, in Tabelle 42 aufgeführt.

**Tabelle 42: Kostenansätze für die Anpassung kommunaler Kläranlagen an unterschiedliche Ablaufgrenzwerte für die Nährstoffe P und N im Szenario A1**

| Maßnahme | Kostenart[a] | Kosten[b] | Bemerkung | Quelle |
|---|---|---|---|---|
| P-Elimination | **Simultanfällung** (bis 2 mg/L (1 mg/L bei GK5) $P_{ges}$ als Grenzwert erreichbar) | | | |
| | | GK 1 und 2 (bis 5000 EW) | | |
| | $K_{ges}$ (€/kg P (€/EW/a)) | 27 (7,3) | | Böhm et al. (2002) |
| | | GK 3 bis 5 (> 5000 EW) | | |
| | $K_{Inv}^{spez}$ (€/EW) | $32985 \cdot EW^{-0,925}$ | Annuisierung von $K_{Inv}^{spez}$ mit T=20a, i=3% | Günthert/ Reicherter (2002) |
| | $K_{Fäll}$–$E_{Abg}$ (€/EW/a) | -1,85 | | |
| | **Flockungsfiltration** (bis 0,5 mg/L $P_{inorg}$ , zusätzlich zur Simultanfällung) | | | |
| | $K_{ges}$ (€/kg P) | 135 | | Böhm et al. (2002) |
| Nitrifikation/ Denitrifikation | Installation **zusätzl. Belebungsbeckenvolumens** zur Erreichung eines höheren Schlammalters | | | |
| | $K_{Inv}^{spez}$ (€/$m^3 V_{BB}$) | $4378*(V_{BB})^{-0,388}$ | Annuisierung von $K_{Inv}^{spez}$ mit T=30a, i=3% | Günthert/ Reicherter (2002), ATV (1997) |

[a] $K_{ges}$ = Gesamtkosten; $K_{Inv}^{spez}$ = spezifische Investitionskosten; $K_{Fäll}$ = Fällmittelkosten; $E_{Abg}$ = eingesparte Abwasserabgabe

[b] Die spezifischen Investitionskosten weisen Skaleneffekte auf; daher nehmen sie mit zunehmender Kapazität (gemessen in EW) bzw. Belebungsbeckengröße ($V_{BB}$) exponentiell ab.

[c] Entsprechend der Gleichung $V_{BB} = B_{dBSB} \cdot ÜS_B \cdot t_{TS}/TS_{BB}$ steigt das Beckenvolumen proportional zum Schlammalter an.

Jeder der aufgeführten Reduktionsansätze erlaubt die Reduktion eines der Nährstoffe ($N_{ges}$ oder $P_{ges}$) bis zu einem bestimmten Grenzwert. Soll der Grenzwert des jeweiligen Nährstoffs weiter gesenkt werden, kommt (zusätzlich) ein Prozess mit einer höheren Leistungsfähigkeit, aber auch höheren Kosten zum Einsatz, was zu einem Kostensprung führt. Es kann also im Hinblick auf die Gesamtkosten günstiger sein, in allen Größenklassen zunächst das Potenzial der Prozesse mit der geringeren Leistungsfähigkeit vollständig auszunutzen, bevor die nächst leistungsfähigeren zum Einsatz gelangen. Andererseits ist wegen der auftretenden Skaleneffekte die Umsetzung des gleichen Prozesses in größeren Kläranlagen bezüglich der spezifischen Kosten u. U. günstiger als in kleineren. Es muss also im Einzelfall überprüft werden, welche Prozesse in den verschiedenen Größenklassen in welchem Umfang zum Einsatz gebracht werden müssen, um den gewünschten Gesamteffekt einer Reduzierung um 20% möglichst kostengünstig zu erreichen.

Im Falle des Stickstoffs umfasste die kostengünstigste Kombination die Nitrifikation mit einem $N_{ges}$-Grenzwert im Kläranlagenablauf von 40 mg/L für die Größenklassen 1 bis 3 und die Denitrifikation mit Grenzwerten von 11 bzw. 9 mg/L für die Größenklassen 4 und 5. Erreicht würde dadurch im deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes eine Reduzierung der $N_{ges}$-Fracht in die Gewässer um 2526 Tonnen pro Jahr zu jährlichen Kosten in Höhe von

4,97 Mio. €. Die günstigste Möglichkeit zur Reduktion der P-Fracht um 20% bestünde in der Einführung der Simultanfällung für kleinere Kläranlagen (GK 1 bis 3) und der Festlegung der entsprechenden Grenzwerte auf 3,5 und 2 mg $P_{inorg}$/L für die Größenklassen 1 und 2 bzw. 3. Außerdem müsste in allen Kläranlagen der Größenklasse 4 eine Flockungsfiltration zur Erreichung eines P-Grenzwertes von 1 mg/L durchgeführt werden; die größten Kläranlagen (GK 5) würde dagegen unverändert mit einem P-Grenzwert von 1 mg/L betrieben. Die auf diese Weise im deutschen Elbegebiet herbeigeführte P-Reduktion würde insgesamt 211 Tonnen pro Jahr betragen und mit 11,33 Mio. € zu Buche schlagen. Für beide Nährstoffe zusammen würde die Reduktion um 20% allein im Elbegebiet also Kosten in Höhe von 16,3 Mio. € verursachen.

Die Hochrechnung der Elbedaten auf ganz Deutschland erfolgt auf der Basis der Abwassermengen, die nach Flussgebieten und Größenklassen aufgegliedert vorliegen (DeStatis 2009) und aus denen für die verschiedenen Größenklassen die in Tabelle 43 angegebenen Faktoren berechnet werden können.

**Tabelle 43: Abwassermengen (in Mrd. m³), die den Kläranlagen verschiedener Größenklassen im Elbegebiet und Deutschland zugeführt werden (DeStatis 2009)**

| Größenklassen | Elbe (deutsch) | Deutschland | Faktor[a] |
|---|---|---|---|
| 1 und 2 | 0,07 | 0,66 | 9,43 |
| 3 | 0,06 | 0,52 | 8,67 |
| 4 und 5 | 1,02 | 8,89 | 8,72 |

[a] Der Faktor berechnet sich als Quotient aus der Abwassermenge Deutschlands und der Abwassermenge im deutschen Teil des Elbegebietes

Werden die Hochrechnungsfaktoren aus Tabelle 43 auf die Zahlen der vorangegangenen Absätze angewendet, dann würden bei Erreichung des 20%-Reduktionsziels Emissionen im Umfang von 23323 Tonnen N und 1909 Tonnen P jährlich vermieden. Die dadurch verursachten Kosten würden sich auf 45,0 Mio. € für die N-Rückhaltung und 100,9 Mio. € für P-Rückhaltung, insgesamt also auf 145,9 Mio. € pro Jahr belaufen.

Würde das Reduktionsziel anstelle von 20 auf 30% erhöht, würden die Gesamtkosten um rund 70% auf etwa 250,6 Mio. € ansteigen. Dieser überproportionale Anstieg ist nicht überraschend, da mit steigenden Reduktionszielen immer anspruchsvollere Verfahren mit höheren spezifischen Kosten zum Einsatz kommen müssen. Umgekehrt ist bei geringerem Reduktionsbedarf mit überproportional sinkenden Kosten in Höhe von 27,1 Mio. € zu rechnen.

### Bewertung der Nutzen

Zur Abschätzung des Nutzens der Anpassungsmaßnahme können verschiedene Ansätze zur Anwendung kommen. Ein erster geht von der Annahme aus, dass der Nutzen den vermiedenen Schadenskosten entspricht. Der Schaden einer nicht erfolgten Reduktion der Nährstofffracht könnte theoretisch darin bestehen, den Ablauf aller Kläranlagen mit Rohwasser soweit verdünnen zu müssen, dass die Konzentration um die angestrebten 20% zurückgeht. Bezogen auf das gesamte deutsche Abwasseraufkommen in Höhe von 10,07 Mrd. $m^3$ bedeutet das, dass zur Erzielung des geforderten Verdünnungseffekts 2,52 Mrd. $m^3$ Rohwasser hinzugefügt werden müssten. Bewertet mit dem in einigen Bundesländern in

Rechnung gestellten Entnahmeentgelt für Grundwasser in Höhe von 0,045 €/$m^3$ ergibt sich daraus eine Schadenssumme in Höhe von 113,4 Mio. €. Dieser Wert ist geringer als die im vorangegangenen Abschnitt berechneten Kosten der Anpassungsmaßnahme in Höhe von 145,9 Mrd. €. Er ist noch deutlich geringer, wenn berücksichtigt wird, dass die um 20 % reduzierte Wasserführung nicht das ganze Jahr über durch Verdünnung ausgeglichen werden muss, sondern nur während der Niedrigwasserperiode (d.h. während 1 bis 2 Monaten). Dennoch wäre es falsch aus diesen Zahlen schon den Schluss zu ziehen, die Anpassungsmaßnahme nicht durchzuführen. Die Verdünnung mit Rohwasser würde zwar den gesetzlichen Anforderungen einer Reduktion der Ablaufkonzentrationen im geforderten Umfang Rechnung tragen, das eigentliche Problem der unveränderten, zu hohen Nährstofffracht bzw. der zu hohen Konzentration im Einleitgewässer wäre damit aber noch nicht gelöst. Dies wäre allenfalls der Fall, wenn auch im Fluss eine entsprechende Verdünnung erfolgen würde. Diese Verdünnung herbeizuführen, würde aber wegen der auch im Niedrigwasserfall im Einleitgewässer i.d.R. viel höheren Wassermengen eine um ein Vielfaches größere Beimischung von Rohwasser erfordern, die dann mit deutlich höheren Kosten verbunden wäre als die bessere Reinigung des Abwassers.

Ein geeigneterer Ansatz zur Schadensbewertung sollte darin bestehen, den von den Nährstoffen verursachten Schaden direkt zu bewerten. Die Abwasserabgabe ist ursprünglich auch mit dem Anliegen eingeführt worden, die Einleiter von Schadstoffen für die von Ihnen verursachten, externen Kosten zur Kasse zu bitten und damit über die vom Gesetzgeber vorgegebenen Grenzwerte hinaus Anreize zu setzen, die Nährstoffemissionen zu reduzieren. Die im vorangegangenen Abschnitt berechneten Reduktionsmengen von Phosphat und Stickstoff in Höhe von 1909 bzw. 23323 Tonnen pro Jahr entsprechen gemäß Abwasserabgabengesetz (AbwAG) 636.333 bzw. 932.920 Schadeinheiten, für die insgesamt Abgaben in Höhe von 56,1 Mio. € zu entrichten wären. Auch dieser Wert ist zu gering, um im Zuge einer Nutzen-Kosten-Bewertung die Anpassungsmaßnahme zu rechtfertigen. Allerdings wird von verschiedenen Seiten auch schon lange in Frage gestellt, ob die Abwasserabgabe sich tatsächlich an den zu vermeidenden Schäden orientiert.

Eine Kosten-Nutzen-Bewertung der Reduktion der Emission von Nährstoffen in Oberflächengewässer, die sich explizit an ökologischen Auswirkungen ausrichtet, hat bislang nicht für die deutschen Flüsse, wohl aber für die deutschen Küstenmeere und hier insbesondere für die Ostsee stattgefunden. Die Helsinki Kommission (Helcom), die sich seit Jahren mit dem Schutz der Ostsee vor Umweltgefahren beschäftigt, sieht hinsichtlich hoher Nährstoffkonzentrationen vor allem die Eutrophierung und die davon ausgehende Beeinträchtigung des Ökosystems als Gefahr an. Um dieses Risiko abzuwenden, wird eine Reduktion der aus den Anrainerstaaten in die Ostsee geleiteten Nährstofffrachten um 50 % als notwendig angesehen. Die Kosten der kosteneffizientesten Maßnahmen, die zur Erreichung dieses Ziels beitragen können, betragen verschiedenen Studien zufolge zwischen 1,6 und 16,5 Mrd. Euro jährlich, mit dem Medianwert bei etwa 3,3 Mrd. Euro (HELCOM 2009). Die Bezifferung des aus der Reduzierung der zufließenden Nährstofffracht resultierenden Nutzens ist im Vergleich zur Kostenbestimmung deutlich schwieriger. Ein Ansatz zur Feststellung des Nutzens der Nährstoffreduktion besteht in der Abschätzung der Ökosystemdienstleistungen, die von Küstenmeeren wie der Ostsee erbracht werden und die durch übermäßige Eutrophierung gefährdet sind. Costanza et al. (1997) zufolge ist die wichtigste von Küstenmeeren erbrachte Dienstleistung das Zyklieren von Nährstoffen, das global mit rund 17000 US-Dollar pro Hektar und Jahr zu Buche schlägt. Für die Ostsee ist von einem Nutzen aus allen erbrachten Dienstleistungen von 2000 bis 3000 US$ pro Hektar und Jahr auszugehen, woraus sich angesichts einer Fläche der Ostsee von 413.000 $km^2$ ein

Gesamtnutzen von über 80 Mrd. US$ jährlich ergäbe. Um abzuschätzen, um welchen Betrag der Wert der Ostsee durch die Eutrophierung tatsächlich beeinträchtigt ist, zogen Turner et al. (1999) Befragungen aus verschiedenen Anrainerstaaten (insbesondere Polen und Schweden) heran, mit deren Hilfe die Zahlungsbereitschaft der Anlieger für einen guten Zustand der Ostsee ermittelt wurde. Im Ergebnis liegt der Nutzen mit knapp 7,4 Mrd. Euro pro Jahr gut doppelt so hoch wie die Kosten (3,3 Mrd. Euro). Im Gegensatz dazu kommen Gren et al. (1997) zu einem Nutzen, der mit 3,36 Mrd. Euro jährlich nur knapp über den Kosten liegt. Alles in allem scheint die Bewertung von Kosten und Nutzen der Reduktion der Nährstoffemissionen in die Ostsee also eher für als gegen die Durchführung dieser Maßnahme zu sprechen.

Was kann aus dem Ergebnis der einzigen umfassenden Kosten-Nutzen-Bewertung der Reduktion von Nährstoffemissionen in das Küstengewässer Ostsee nun für die Reduktion von Nährstoffemissionen in die deutschen Flüsse in Niedrigwasserperioden abgeleitet werden? Beide Kontexte unterscheiden und überlappen sich in mehrfacher Hinsicht:

Flüsse unterscheiden sich hinsichtlich ihres Ökosystems deutlich von den Meeren, woraus zunächst für die Flüsse selbst auch Unterschiede bzgl. der Kosten und Nutzen resultieren. Allerdings münden fast alle Flüsse früher oder später in die Küstenmeere. Daraus folgt, dass die Nährstoffe, die primär den Flüssen zugeführt werden, vor allem in den Meeren, in denen sie sich ansammeln, ihre Wirkung entfalten. Eine Folge hinsichtlich möglicher daraus resultierender Schäden ist, dass die Wirkungen wasserbürtiger Nährstoffeinleitungen im Meer vor allem durch Maßnahmen an den Flüssen beeinflusst werden können. Berücksichtigt ist dabei, dass schon in den Flüssen ein Teil der Nährstoffe zurückgehalten wird. Diese Wirkungsketten sind in den oben aufgeführten Kosten- und Nutzenerwägungen zur Eutrophierung der Ostsee berücksichtigt. Dass die Mehrzahl der deutschen Flüsse, die in ein nördliches Küstenmeer münden, eher der Nordsee als der Ostsee Nährstoffe zuführen macht dabei keinen entscheidenden Unterschied, da auch die Nordsee im relevanten Bereich relativ flach ist, empfindliche Lebensräume wie das Wattenmeer aufweist und von Eutrophierung gekennzeichnet ist (OSPAR 2009). Insofern wäre es grundsätzlich möglich, die HELCOM-Ergebnisse auf die Nordsee und die ihr zufließenden Flüsse zu übertragen.

Die Differenzierung zwischen den Ökosystemen Fluss und Küstenmeer kommt im Kontext der Anpassung an den Klimawandel aber aus einem anderen Grund zum Tragen. In der vorliegenden Fallstudie geht es um die Auswirkungen von Nährstoffeinleitungen in Niedrigwasser führende Flüsse. Niedrigwasser beeinflusst das Ökosystem Fluss durch die Einengung des Lebensraums, die Veränderungen der Konzentrationen von im Flusswasser enthaltenen Substanzen und ggf. auch durch Veränderungen der Temperatur ganz deutlich, wogegen die angrenzenden Meere durch die Wasserführung der einmündenden Flüsse in viel geringerem Umfang beeinflusst werden. Gleichzeitig sind Niedrigwasserperioden vorübergehende Ereignisse, deren Wirkungen in vielen Fällen reversibel sind. D.h. selbst wenn Zeiten niedriger Wasserführung ein verstärktes Algenwachstum und damit Eutrophierung zur Folge haben, so ist diese Wirkung einschließlich der dadurch ggf. verursachten Reduktion der Ökosystem-Dienstleistungen nicht von Dauer. Costanza et al. (1997) sehen Wasserregulierung und -versorgung, die Aufbereitung von Abwasser und die Freizeitnutzung als die wesentlichen Ökosystemfunktionen an, die Flüsse und Seen für die Menschen bereitstellen. Die Wasserregulierung ist im Falle von Niedrigwasser nicht relevant. Die Wasserversorgung ist in Zeiten niedriger Wasserführung in erster Linie ein Mengenproblem, obwohl sich im Falle der Trinkwassergewinnung aus dem Uferfiltrat von Flüssen auch die erhöhten Nährstoffkonzentrationen negativ auf den erforderlichen Umfang

und die Kosten der Trinkwasseraufbereitungen auswirken können. Schließlich ist sicher auch der Freizeitwert von der Wasserqualität betroffen, wobei hier Binnen- bzw. Badeseen sicher eine größere Rolle spielen als Flüsse.

Da den Autoren keine Studien über den Einfluss niedriger Wasserführung auf den Nutzungswert von Flüssen bekannt sind, kann an dieser Stelle nur eine sehr grobe, überschlägige Rechnung durchgeführt werden. Von der Gesamtfläche Deutschlands nehmen Flüsse bei durchschnittlicher Wasserführung einige hundert Quadratkilometer in Anspruch. Der Anteil der Seen ist zwar deutlich größer, hier wirken sich niederschlagsarme Perioden aber nicht so stark auf den Wasserstand und somit auf die Wasserqualität aus, zumal in ihrem Umkreis die Anforderungen an die Qualität eingeleiteten, gereinigten Abwassers sowieso schon deutlich höher sind. Auch Feuchtgebiete sollten in diesem Kontext keine bedeutende Rolle spielen, da sie zwar vom Wasserstand verbundener Flüsse und Seen abhängig sind, aber i.d.R. keine Nährstoffeinleitungen aus der Abwasserbehandlung stattfinden. Der Wert der Wasserreinigungsfunktion und der Freizeitwert von Flüssen und Seen werden von Costanza et al. (1997) mit 665 und 230 US$ pro Hektar und Jahr beziffert. Für die Wasserversorgungsfunktion sind zwar 2117 US$ angegeben, davon entfällt auf den Aspekt der Wasserqualität nur ein Teil, angenommen 500 US$ pro Hektar und Jahr. Das ergibt insgesamt rund 1400 US$ bzw. 1000 Euro pro Hektar und Jahr. Nehmen wir als relevante Flussoberfläche 500 $km^2$ an, so resultiert daraus ein Gesamtwert der Ökosystemdienstleistung in Höhe von 50 Mio. Euro pro Jahr. Allerdings geht diese Dienstleistung im Falle des Niedrigwassers weder dauerhaft noch vollständig verloren, so dass nur ein Teil des genannten Nutzenwertes zum Ansatz kommen darf – nach einer überschlägigen Schätzung auf der Basis der Dauer der Niedrigwasserperiode(n) etwa im einstelligen Millionenbereich. Dieser Betrag ist wieder deutlich kleiner als die Kosten der weitergehenden Nährstoffreduktion in Höhe von 145,9 Mio. Euro und damit alleine nicht geeignet, die Reduktion der Nährstoffemissionen wirtschaftlich zu rechtfertigen.

### Beurteilung der Maßnahme

Auf der Basis des Kosten-Nutzen-Vergleichs der Maßnahme alleine ist es kaum möglich, die Reduktion von Nährstoffemissionen aus Kläranlagen zum Zwecke der Aufrechterhaltung der Wasserqualität im Falle Niedrigwasser führender Flüsse zu rechtfertigen. Der unmittelbare Nutzen aus den Ökosystemfunktionen ist mangels wichtiger Daten nur äußerst grob abschätzbar und gelangt zu einem vergleichsweise geringen Nutzenwert. Alle anderen, indirekteren Ansätze, den Nutzen zu bestimmen, führen zwar teilweise zu höheren Nutzenwerten, stoßen aber schnell an methodische Grenzen. Es gibt aber ein entscheidendes Argument, warum die Maßnahme dennoch als empfehlenswert angesehen werden kann. Unabhängig von der durch den Klimawandel bedingten Erhöhung der Häufigkeit und Dauer von Niedrigwasserperioden trägt die Reduktion der Einleitung von Nährstoffen in Flüsse auch zu einer entsprechenden, dauerhaften Entlastung der Küstenmeere bei, in die sie münden, und im Falle der Ostsee konnte hier zumindest für die kostengünstigeren Reduktionsansätze ein vorteilhaftes Nutzen-zu-Kosten-Verhältnis ermittelt werden. Kostengünstig bedeutet in diesem Fall bspw. Reduktionskosten von weniger als 150 Euro pro Kilogramm zurückgehaltenen Phosphors (HELCOM 2009). Die im vorliegenden Fallbeispiel untersuchten Reduktionsansätze für Phosphor verursachen Kosten von durchschnittlich knapp 24 und maximal 138 Euro pro Kilogramm Phosphor und erfüllen damit diese Bedingung. Damit ist das Nutzen-zu-Kosten-Verhältnis der Nährstoffreduktion schon

unabhängig von der Anpassung an den Klimawandel größer als 1 und dürfte sich durch die positive Wirkung vermehrten, durch den Klimawandel bedingten Niedrigwassers weiter verbessern.

Der dargestellte Synergieeffekt zwischen der Vermeidung von Eutrophierung in Küstengewässern und der Verbesserung der Wasserqualität in den Flüssen selbst stellt außerdem einen unmittelbaren Hinweis auf das No Regret-Potenzial der Reduktion der Nährstofffrachten im Ablauf von Kläranlagen dar. Selbst wenn der Klimawandel keine häufigeren oder länger andauernden Trockenperioden mit niedriger Wasserführung in den Flüssen nach sich ziehen sollte, haben die Investitionen in die Ertüchtigung der Kläranlagen einen Nutzen, der ausreichend groß ist, um die Kosten zu rechtfertigen. Das gilt erst recht, wenn die Veränderungen weniger stark ausfallen sollten als erwartet. Sollte der Klimawandel dagegen längere Trockenperioden mit häufigeren oder länger andauernden Niedrigwasserständen zur Folge haben, so lässt sich ein Teil der Kläranlagen im Hinblick auf die Reduzierung der Nährstoffemissionen weiter ertüchtigen, ohne dass die im ersten Schritt bereits getätigten Investitionen obsolet würden. Allerdings ist zu erwarten, dass die spezifischen Kosten pro Einheit zusätzlich zurückgehaltener Nährstoffe weiter ansteigen werden.

Die Reduzierung der Nährstoffkonzentrationen in den Gewässern richtet sich primär auf den Schutz der Natur und die Funktionen, die sie auch zum Vorteil der Menschen erfüllt. Im Extremfall, z.B. beim vermehrten Auftreten von Blaualgen in Badegewässern, oder indirekt, wenn aufgrund des durch Eutrophierung verminderten Selbstreinigungspotenzials vermehrt Schadstoffe im Wasser verbleiben, kann das Unterlassen der Maßnahme auch negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zeitigen.[34] Dennoch besitzt diese Maßnahme entsprechend den in Kapitel 2.2 aufgeführten Maßstäben keinen Need-to-have Charakter. Umso mehr gewinnt die Kosten-Nutzen-Analyse an Bedeutung bei der Entscheidung, ob und in welchem Umfang, die Maßnahmen zur Nährstoffreduktion in Kläranlagenabläufen zum Einsatz kommt. Und diese kommt letztlich für die aufgeführten Ertüchtigungsmaßnahmen zu einer positiven Bewertung.

Die angegebenen Technikansätze stellen dabei den (fortgeschritten) Stand der Technik dar, der seine Wirksamkeit bereits in vielen Fällen bewiesen hat, in denen er bislang schon zum Einsatz kam. Letzteres ist bspw. in all den Fällen der Fall, in denen Kläranlagen gereinigtes Abwasser in Wasserschutzgebiete oder Badegewässer ableiten und daher auch heute schon erhöhte Anforderungen an die Wasserqualität gestellt werden. Ihre hohe Wirksamkeit bezieht die Nährstoffreduktion im Kläranlagenablauf auch aus der Tatsache, dass sie als End-of-pipe-Ansatz im lange etablierten System der zentralen Sammlung und Behandlung von kommunalem Abwasser zum Einsatz kommt. Die Nährstofffracht des Abwassers ist dabei schon seit Mitte der 1980er Jahre in den Fokus des Umweltschutzes, speziell des Meeresschutzes gerückt. Seit dem wurden die Maßnahmen zu ihrer Reduktion immer weiter intensiviert. Ebenfalls typisch für den End-of-pipe-Charakter der Nährstoffreduktion im Kläranlagenablauf ist die lange andauernde Wirkung, die allerdings keine Dynamik aufweist. D.h. der Prozess der Nährstoffreduktion ist optimal an die jeweilige Kläranlage angepasst, die ihrerseits optimal an die zentrale Abwassersammlung angepasst ist. Umgekehrt kann aus ebendiesen Gründen nur sehr beschränkt auf Veränderungen der Rahmenbedingungen

[34] Außerdem können auch die von den Ökosystemen Küstenmeer und Fluss erbrachten Dienstleistungen letztlich als für den Bestand der Menschheit als essenziell angesehen werden.

reagiert werden, da Kanalisation und Kläranlagen hohe, spezifische Investitionen voraussetzen, die darüber hinaus eine lange Lebensdauer aufweisen.

Die Abwasserbehandlung zählt ebenso wie das Abfallmanagement zu den hoheitlichen Aufgaben der öffentlichen Hand. Dabei legen der Gesetzgeber und die oberen Wasserbehörden die grundsätzlichen Anforderungen fest, die die Abwasserbehandlung zu erfüllen hat. Im vorliegenden Fall also die Notwendigkeit der Reduktion der Nährstoffemissionen. Wie diese Anforderung möglichst zuverlässig und kostengünstig umzusetzen ist, dazu würden in spezialisierten Gremien der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) technische Konzepte entworfen und erprobt. Diese Gremien bestehen u. a. aus Mitgliedern der überwachenden Behörden, der einschlägigen Forschungseinrichtungen, den potenziellen Herstellern der Anlagen und den Betreibern von Abwasserbehandlungsanlagen. Werden in diesen Gremien neue technische Lösungen identifiziert, die die von Behördenseite aufgestellten Anforderungen erfüllen, dann gelten diese fortan als Stand der Technik und gelangen nach und nach in allen Kläranlagen zum Einsatz. Die zusätzlichen Kosten der erforderlichen neuen Anlagen werden über die Abwassergebühr dem Wasser- und Abwasserkunden angelastet. Weitere Anreize zur Einführung der neuen Technologie bspw. seitens der Wasser- bzw. Abwasserkunden sind also nicht erforderlich. Da es eine finanzielle Förderung für die Implementierung seitens der privaten Kunden nicht gibt, können Mitnahmeeffekte ausgeschlossen werden. Aufgrund des Charakters der Abwasserbehandlung als hoheitliche Aufgabe und der konsensualen Findung von innovativen Ansätzen ist die politische und soziale Akzeptanz einer fortschrittlichen Abwasserbehandlung grundsätzlich sehr hoch. Eine Ausnahme ist dann gegeben, wenn die neuen Technologien teuer sind und zu einer deutlichen Erhöhung der Abwassergebühren führen würden. Da die Abwasserent- ebenso wie die Wasserversorgung aus Kundensicht zu den inferioren Gütern gehört, ist die Zahlungsbereitschaft dafür bei den Bürgern relativ gering. Das gilt umso mehr, wenn die Bürger über den Nutzen der Maßnahmen nicht ausreichend informiert sind und/oder der unmittelbare Bezug zu den eigenen Lebensverhältnissen nicht offensichtlich ist. Da die Bürger gleichzeitig Wähler sind, versuchen die (meist lokalen) Politiker, Situationen mangelnder Akzeptanz möglichst zu vermeiden.

### Tabelle 44: Auswertung der Maßnahme „Anpassung der Kläranlagenablaufqualität an die reduzierte Wasserführung der Einleitgewässer“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Schutz menschlichen Lebens und der menschlichen Gesundheit sind nicht unmittelbar gefährdet, längerfristig könnte aber die Sicherung der Lebensgrundlagen gefährdet sein. |
| **Effektivität** | Hoch | Die gewünschte Anpassung kann mit Hilfe bewährter Technologie gut erreicht werden. Allerdings ist der Nutzen nicht eindeutig höher als die Kosten (Unsicherheit). |
| **Mitnahmeeffekte** | Keine | Da die Abwasserbehandlung eine gebührenfinanzierte Gemeinschaftsaufgabe ist, ist mit Mitnahmeeffekten nicht zu rechnen. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein, aber Wirkung andauernd | Einmal etabliert können die Maßnahmen zur Verbesserung der Kläranlagenablaufqualität zwar weiter verbessert oder außer Kraft gesetzt werden; dazu muss der Entscheidungsprozess aber erneut durchlaufen und weitere Investitionen getätigt werden. |
| **Reichweite** | Kommunal bis international | Die Abwasserentsorgung liegt zwar in der Hand der Kommunen, die Überwachung geschieht aber auf Kreis und die Setzung der (Rahmen)vorgaben auf Länder- und Bundesebene. Schließlich koordiniert wegen der grenzüberschreitenden Wirkung großer Flussgebiete die Europäische Kommission mit Hilfe bspw. der kommunalen Abwasserrichtlinie. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Die Abwasserbeseitigung genießt als hoheitliche Aufgabe hohe Akzeptanz, solange die Kosten nicht zu stark ansteigen. |
| **Regret/No-regret** | No regret | Da sich die Reduzierung der Nährstofffrachten im Ablauf von Kläranlagen sowohl auf Niedrigwasser führende Flüsse als auch das vorgelagerte Küstenmeer positiv auswirkt, ist die Maßnahme auch dann nicht obsolet, wenn sich Häufigkeit und Intensität von Niedrigwassern nicht ändern. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Die Kosten steigen überproportional zur Wirkung, vor allem wenn gänzlich andere, inkompatible Technikansätze zum Einsatz kommen (sunk costs) |

## 3.5 Handlungsfeld Bauwesen

### 3.5.1 Anpassungsmaßnahme „Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren durch Anpassung im Wohnungsbau“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Die Hitzewelle des Jahres 2003 hat statistischen Berechnungen zufolge europaweit ca. 30.000 und in Deutschland immerhin ca. 7.000 Menschenleben gefordert und darüber hinaus zu erheblichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen geführt (Zebisch et al. 2005). Ein Ausnahmesommer wie dieser wird im Zuge des Klimawandels im Verlaufe dieses Jahrhunderts immer häufiger vorkommen, aber auch im 4-Grad-Referenzszenario bis zum Jahr 2100 nicht zur Regel geworden sein. Da Arbeitgeber aus arbeitsrechtlichen Gründen auch heute schon gezwungen sind und darüber hinaus aus betriebswirtschaftlichen Gründen (d.h. Erhalt der Arbeitsproduktivität; vgl. Kapitel 3.6.2) ein Interesse haben, am Arbeitsplatz hinsichtlich der Umgebungstemperatur gewisse Minimalstandards einzuhalten oder Ausgleichsmaßnahmen zu ergreifen, ist davon auszugehen, dass die überwiegende Mehrzahl der hitzebedingten gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Toten durch Maßnahmen privater Akteure zu verhindern wären. Dafür spricht auch, dass die von der Hitze am schwersten betroffenen Personen meistens älter sind oder gesundheitliche Vorbelastungen aufweisen, so dass davon auszugehen ist, dass sie nicht (mehr) in vollem Umfang erwerbstätig sind. Insgesamt ist festzustellen, dass die Vermeidung von Hitzeansammlungen in Gebäuden auch deutliche Querbezüge zum Handlungsfeld Gesundheit aufweist. Der Schutz des Menschen und seiner Gesundheit vor den Wirkungen der Klimaerwärmung hat einen hohen Schutzgutcharakter. Damit kommt die Fürsorgepflicht des Staates ins Spiel und es wird zu diskutieren sein, welchen Beitrag er leisten kann oder sollte.

Die Maßnahmen zur Vermeidung dieser Schäden können auf verschiedenen Verursachungsebenen ergriffen werden. Es kann einerseits versucht werden, die zunehmende Wärme überhaupt am Eindringen in die Gebäude zu hindern. Andererseits kann eingedrungene Wärme mittels Klimaanlagen entfernt werden (BBR 2008, Grothmann et al. 2009). Der erste Ansatz, der an den Ursachen der Gebäudeerwärmung ansetzt, weist deutliche Synergien mit Ansätzen zur Vermeidung des Klimawandels auf, bei denen mittels Wärmedämmung der Gebäudehülle versucht wird, Wärmeverluste und damit den Heizenergiebedarf im Winter zu reduzieren. Im Falle sommerlicher Hitze verhindert die gleiche Wärmedämmung das Eindringen von Wärme ins Gebäude. Im Zusammenhang mit der Kosten- und Nutzenermittlung der Klimaanpassung im Bauwesen werden wir diesen Aspekt unberücksichtigt lassen, weil die Wärmedämmung im Neubaubereich (und teilweise auch bei der Sanierung des Bestandes) einen Standard darstellt, der sowieso zum Einsatz gelangt. Interessanter sind in diesem Zusammenhang Fensterflächen, da sie eine deutlich höhere Wärmedurchlässigkeit aufweisen und, vor allem in Südausrichtung, eine stärkere direkte Sonneneinstrahlung erlauben, die im Winter zwar erwünscht, im Sommer hingegen unerwünscht ist. Hier können zusätzliche Verschattungselemente zum Einsatz kommen, die das Eindringen der Wärme zu verhindern. Schließlich werden verstärkt auch Klimaanlagen eingesetzt, um diejenige Wärme abzuführen, die vor allem bei länger anhaltenden Hitzeperioden trotz Schutzmaßnahmen den Weg ins Gebäude findet.

Der Studie von Jochem & Schade (2009) zufolge wird der Strombedarf für die Kühlung von Wohngebäuden in Deutschland im Zeitraum von 2005 bis 2050 von 65 auf 450 Mio. kWh ansteigen. Ein Teil dieses Anstieges ist darauf zurückzuführen, dass Klimaanlagen sich unabhängig vom treibhausbedingten Temperaturanstieg wachsender Beliebtheit erfreuen und außerdem die ggf. zu kühlende Wohnfläche stetig wächst. Von dem oben aufgeführten Anstieg um 589 % sind dementsprechend im dem der Studie zugrunde liegenden 4-Grad-Szenario nur 286 % auf den Klimawandel zurückzuführen, so dass die im Jahr 2050 zu diesem Zweck zusätzlich aufzuwendende Strommenge der Studie zufolge 186 Mio. kWh (pro Jahr) beträgt. Allerdings gehen Jochem & Schade (2009) dabei davon aus, dass 2005 weniger als 3 und selbst 2050 kaum mehr als 10 % der Haushalte in Deutschland mit Klimaanlagen ausgestattet sein werden. Da in der vorliegenden Studie aber die Kosten des flächendeckenden Schutzes der Bevölkerung gegen die gesundheitlichen Folgen der Klimaerwärmung bestimmt werden sollen, muss zunächst der Anteil der Bevölkerung festgelegt werden, der überdurchschnittlich von der Klimaerwärmung betroffen ist. Das sind gemäß Regionalem Klimaatlas die Bewohner der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Thüringen, Rheinland-Pfalz und das Saarland mit einer Gesamtbevölkerung 36,6 Mio. Demzufolge müssen 44,7 % der Haushalte gegen die Hitze geschützt werden, d.h. der Energieverbrauch würde gegenüber der Annahme von Jochem & Schade (2009) um den Faktor 4,5 auf 831 Mio. kWh ansteigen. Bei einem angenommenen Strompreis von 0,2 Euro pro kWh liefe das auf (Betriebs-)Kosten in Höhe von 166 Mio. Euro jährlich im Jahr 2050 hinaus. Hinzu kämen (als Ausdruck der externen Kosten des Betriebs der Klimaanlagen) noch die Kosten der für die Stromproduktion notwendigen $CO_2$-Emissionszertifikate, die sich unter der Annahme des gegenwärtigen deutschen Strommixes (mit 600 g $CO_2$/kWh)[35] und Zertifikatspreisen von 30 Euro pro Tonne $CO_2$ (vgl. Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2008) auf 15 Mio. Euro belaufen.

Hinzuzurechnen sind außerdem die Investitionskosten für die Klimaanlagen, die von Jochem und Schade für Westeuropa mit 201 Mio. Euro jährlich angegeben werden und für Deutschland auf der Basis des Bevölkerungsanteils[36] zu 62 Mio. Euro berechnet werden können. Da Jochem und Schade von einer 10-prozentigen Ausstattung mit Klimaanlagen ausgehen, wäre auch dieser Wert hinsichtlich eine umfassende Ausstattung mit Klimaanlagen bis 2050 mit dem Faktor 4,5 zu multiplizieren, so dass sich jährliche Investitionskosten von 277 Mio. Euro und, zusammen mit dem Stromverbrauch, jährliche Gesamtkosten für die an die Klimaerwärmung angepasste Klimatisierung von privatem Wohnraum von 458 Mio. Euro ergeben.

Eine Einsparmöglichkeit ergibt sich aus dem verstärkten Einbau und der konsequenteren Nutzung von Verschattungselementen wie Rollläden oder (Außen-) Jalousien, durch die das

---

[35] Obwohl anzunehmen ist, dass der deutsche Strommix im Jahr 2050 einen deutlich geringeren $CO_2$-Ausstoß zur Folge haben wird als heute, wird der aktuelle Strommix unterstellt um auch die Folgekosten zu berücksichtigen, die eine Stromversorgung mittels erneuerbarer Energiequellen nach sich zieht.

[36] Western Europe umfasst die Länder Frankreich, Deutschland, Großbritannien, Schweiz, Irland und die Benelux-Staaten mit einer Bevölkerung von insgesamt 237 Mio. im Jahr 2050. Davon macht Deutschland mit dann 73 Mio. Einwohnern 31 % aus (Jochem und Schade 2009).

Eindringen von Hitze reduziert werden kann. Dadurch wird teilweise eine zusätzliche Kühlung ganz überflüssig oder die Betriebskosten einer vorhandenen Kühlung werden zumindest deutlich gesenkt. Großenteils sind Rollläden schon heute vorhanden, ihre Nutzung geht aber mit einer Verdunkelung entsprechend verschatteter Räume einher, so dass Jalousien hier eine deutlich komfortablere Lösung darstellen. Im Neubaubereich ist ihr Einbau mit einem Mehraufwand von schätzungsweise ein bis zwei Prozent der Bausumme verbunden; im Bestand ist der Einbau nur zusammen mit den ganzen Fenstern z.B. im Rahmen einer Grundsanierung möglich. In jedem Fall würden die Investitionskosten der Verschattung sich durch die eingesparten Kühlungskosten in kurzer Zeit amortisieren. Um welchen Anteil sich die oben angegebenen Gesamtkosten durch diese Teilmaßnahme reduzieren ließen, kann auf der Basis vorhandener Daten an dieser Stelle nicht genauer bestimmt werden. Eine Reduktion um 30 % läge aber sicher im Bereich des Möglichen. Insgesamt lägen die Kosten damit in einem Bereich zwischen 321 und 458 Mio. Euro (entsprechend 0,014 bis 0,02 % des BIP).

Bei den vermiedenen Schäden, die auf der Nutzenseite zum Tragen kommen, sind insbesondere die Verluste an Menschenleben und die Gesundheitsbeeinträchtigungen zu nennen. Die hitzebedingten Mortalitätskosten sind in der Studie von Ecoplan (2007) anhand des „Value of statistical life“ und des „Value of lost life years“ berechnet worden. Für die Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle wurde auf das Extremjahr 2003 Bezug genommen, in dem in der Schweiz im Verlauf der Hitzeperiode im August schätzungsweise 1000 Menschen mehr zu Schaden kamen als in durchschnittlichen Sommern (Ecoplan 2007). In Deutschland kommen vergleichbare Schätzungen zu einer Zahl von 7.000 zusätzlichen Toten (Zebisch et al. 2005), was angesichts des Verhältnisses der Einwohnerzahl (in 2009 7,7 Mio. in der Schweiz gegenüber 81,9 Mio. in Deutschland) auf eine in Deutschland um den Faktor 1,5 verringerte Betroffenheit hindeutet. In der schweizerischen Studie wurde so vorgegangen, dass die Toten mittels Statistiken verschiedenen Altersgruppen zugeordnet und für jede Altersgruppe die Anzahl der verlorenen Lebensjahre abgeschätzt wurde. Wird die Gesamtzahl der verlorenen Monate (d.h. das Produkt aus durchschnittlichem Verlust und der Anzahl der Betroffenen in jeder Altersgruppe) mit dem statistischen Wert eines verlorenen Lebensjahres multipliziert, so erhält man den Gesamtschaden. In der Schweiz betrug der Wert eines verlorenen Lebensjahres 85.000 CHF. In Deutschland würde er unter Berücksichtigung des etwas niedrigeren Pro-Kopf-Sozialproduktes und des Wechselkurses ca. 48.000 Euro betragen.[37] Daraus würde für die zusätzlichen Hitzetoten des Jahres 2003 unter Zugrundelegung einer der Schweiz vergleichbaren Altersstruktur in Deutschland ein Schaden in Höhe von 1,11 Mrd. Euro, entsprechend 0,05 % des BIP, resultieren. Da die Temperaturen des Hitzesommers von 2003 dem 4-Grad-Szenario zufolge auch im Jahr 2100 noch über dem Durchschnitt liegen werden, sind die für 2100 erwarteten Mortalitätskosten niedriger als die für 2003 berechneten. Sie betragen Ecoplan (2007) zufolge 0,04 % des BIP und sollten für Deutschland in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Da die Sterblichkeit mit der Temperatur stark überproportional ansteigt, erwartet Ecoplan (2007) für das Jahr 2050 (mit einem zu erwartenden Temperaturanstieg von 1,5°C) eine statistisch nicht mehr nachweisbare Zahl zusätzlicher Hitzetote und einen mortalitätsbedingten Schaden von 0,001 % des BIP (entsprechend 22 Mio. Euro in Deutschland).

[37] Zugrunde gelegt wurde ein kaufkraftbereinigtes Pro-Kopf-BIP von 43007 USD für die Schweiz und 34.212 USD für Deutschland und ein Wechselkurs CHF zu EUR von 1,4:1.

Eine monetäre Bewertung der hitzebedingten gesundheitlichen Beeinträchtigungen wurde von Hübler & Klepper (2007) durchgeführt. Sie schätzen aufgrund des Klimawandels in Deutschland bis zum Jahr 2100 hauptsächlich auf extreme Hitzesituationen zurückzuführende jährliche Mehrkosten im Gesundheitssektor von etwa 0,4 Mrd. Euro. Zusammen mit den volkswirtschaftlichen Schäden durch hitzebedingte Todesfälle wären das 0,07 % des BIP. Beim Übertragen dieser Zahlen auf das Jahr 2050 ist davon auszugehen, dass die Gesundheitskosten nicht so stark sinken werden wie die Kosten der Todesfälle. Wir gehen davon aus, dass auch im Jahr 2050 schon zusätzliche hitzebedingte Krankheitskosten in Höhe von mindestens 100 Mio. Euro auftreten werden. Zusammen mit den mortalitätsbedingten Schäden ergäbe das 122 Mio. Euro oder 0,006 % des BIP – mit einer unsicherheitsbedingten Schwankungsbreite von 0,003 bis 0,01 %.

### Beurteilung der Maßnahme

Ein Vergleich von Kosten und Nutzen der Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren durch Anpassungen im Wohnungsbau zeigt, dass bis zum Jahr 2050 die vermiedenen Schäden (0,003 bis 0,01 % des BIP) noch deutlich kleiner sind als die Kosten (0,014 bis 0,02 % des BIP). Das gilt jedenfalls, wenn für die betroffenen Regionen eine flächendeckende Ausstattung mit Wärmeschutzmaßnahmen ins Auge gefasst würde. Für das Jahr 2100 können wir dagegen davon ausgehen, dass den Kosten in Höhe von dann schätzungsweise 0,04 bis 0,06 %[38] des BIP vermiedene Schäden in Höhe von 0,07 % gegenüber stehen würden. Die Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren für die Bewohner durch Anpassung im privaten Wohnungsbau weist den Berechnungen zufolge also erst zum Ende dieses Jahrhunderts ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf. Sollen die vorhandenen finanziellen Ressourcen also effizient verwendet werden, dann stellt der weitgehende Schutz von Wohngebäuden und ihren Bewohnern vor der Klimaerwärmung allenfalls ein längerfristiges Ziel dar.

Obwohl im vorliegenden Fallbeispiel das Leben und die Gesundheit von Menschen auf dem Spiel steht, kann auch angesichts des wenig vorteilhaften Nutzen-Kosten-Verhältnisses die Aufgabe des Staates nicht darin bestehen, alle Wohnungen mit Hitzeschutzeinrichtungen auszustatten oder diese Ausstattung flächendeckend zu subventionieren. Stattdessen erscheint die Förderung von Hitzeschutzmaßnahmen für Wohngebäude nur zielführend, wenn sie gezielt auf Wohnraum ausgerichtet ist, der von durch die Hitze gefährdeten Personen bewohnt ist. Umgekehrt ist auch zu berücksichtigen, dass der Wohnraum in Deutschland verglichen bspw. mit Frankreich gegenwärtig und in der nahen Zukunft voraussichtlich nur in geringem Umfang mit Kühlungen oder Verschattungseinrichtungen ausgestattet ist (ca. 3 %) bzw. sein wird (ca. 10 % bis 2050) und dass die zu erwartenden geringen Zuwächse ohne zusätzliche Förderung vor allem bei einem Personenkreis umgesetzt würden, der über die notwendigen Ressourcen verfügt, und nicht in erster Linie dort, wo es aus gesundheitlichen Gründen geboten erscheint. Als Zielgruppen für eine Unterstützung kämen also zuallererst die Betreiber bzw. Bewohner von Krankenhäusern, Senioren- und Pflegeheimen in Frage, wobei in diesen Fällen oft schon von Gesetzes wegen

[38] Dabei gehen wir davon aus, dass 90 % der Haushalte mit Wärmeschutzeinrichtungen ausgestattet sind und der zusätzliche Stromverbrauch gegenüber 2050 um den Faktor 4 ansteigt.

die Verpflichtung zur Einleitung von Schutzmaßnahmen besteht. Daneben könnten Haushalte von Betroffenen bei Bedarf unterstützt werden, wenn sie ihre medizinische (und ggf. auch finanzielle) Bedürftigkeit nachweisen. In diesem Fall würde die Maßnahme (wegen der geringeren Kosten) nicht nur schon früh ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen, sondern hätte den zusätzlichen Vorteil, dass die staatlich unterstützten zusätzlichen Belastungen für das Klima, die speziell vom Betrieb von Klimaanlagen ausgehen, auf das unbedingt notwendige Maß beschränkt würden. Auch Mitnahmeeffekte könnten durch diese restriktive Handhabung weitgehend ausgeschlossen werden.

**Tabelle 45: Auswertung der Maßnahme „Hitzeanpassung im Wohnungsbau“**

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, absoluter Schutzgedanke | Im Vordergrund steht der Gesundheitsschutz der Bevölkerung und damit ein absolutes Schutzgut. |
| **Effektivität** | Mittel | Ein wirksamer Schutz gegen die Hitze ist zumindest innerhalb von Gebäuden möglich; der Aufwand ist aber relativ hoch. |
| **Mitnahmeeffekte** | Gering | Wenn der Staat sich auf die Unterstützung von Haushalten beschränkt, bei denen eine gesundheitliche Gefährdung und finanzieller Bedarf angezeigt ist, sind die Mitnahmeeffekte gering. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Wenn alle relevanten Gebäude klimatisiert sind, entstehen keine weiteren dynamischen Effekte. Die Gefährdung muss den Betroffenen durch geeignete Multiplikatoren (z.B. Ärzte) verdeutlicht und ihnen Möglichkeiten der Anpassung aufgezeigt werden. |
| **Reichweite** | Regional | Sinnvoll wäre die Ausweisung von Regionen mit besonderer Betroffenheit, damit nur dort gefördert wird, wo die Notwendigkeit besteht. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Da akute Beschwerden gelindert werden, sollte die Akzeptanz hoch sein. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Da die Maßnahme nur in begrenztem Umfang und bei entsprechendem Bedarf durchgeführt wird. |
| **Szenario-Variabilität** | Gering | Da die gefährdeten Personen besonders sensibel auf Hitzeperioden reagieren, wirkt sich die Maßnahme auch bei geringerer Ausprägung des Klimawandels aus. |

### 3.5.2 Anpassungsmaßnahme „Schutz von Gebäuden vor verstärkten Stürmen – Starkregen und Wind“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Während bei der Maßnahme „Vermeidung hitzebedingter Gesundheitsgefahren durch Anpassung im Wohnungsbau“ vor allem der Schutz der Gesundheit der Bewohner im Vordergrund steht und der Erhalt der Bausubstanz nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Interessenlage beim Schutz von Gebäuden (baulichen Anlagen) vor Stürmen, d.h. Starkregen, Hagel und Wind vielschichtiger: In erster Linie geht es dem Baurecht entsprechend darum, dass ein Gebäude den Schutz der darin befindlichen Personen gewährleisten soll, selbst wenn das Gebäude teilweise beschädigt wird. In zweiter Linie besteht das Ziel darin, dass die Funktionsfähigkeit des Gebäudes und der darin befindlichen Einrichtungen sichergestellt werden soll (wie z.B. bei Krankenhäusern, Kraftwerken). Auch hier können nicht funktionsbeeinträchtigende Gebäudeschäden hingenommen werden. Meist wird auf dieser Ebene auch die Verhinderung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen (Heizöl, Gas) mit abgedeckt. Erst in dritter Linie stellt sich die Frage, wie vor allem die Gebäudehülle, d.h. Dach, Außenwände und Fenster, so gestaltet werden können, dass der für den Klimawandel vorhergesagte Anstieg der Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen weder die Hülle selbst noch das von ihr umgebene Gebäude schädigen kann. Dazu zählt auch das Eindringen von Wasser aus der Kanalisation und aufgrund der Überflutung der unmittelbaren Umgebung des Gebäudes durch Mängel beim Abfluss des Niederschlagswassers. Der Schutz des Gebäudes ist in allen Fällen der privaten Vorsorge des Gebäudebesitzers zuzuordnen. Hinsichtlich Schäden durch das Gebäude (wegfliegende Ziegel) besteht eine Unterhaltungs- und Verkehrssicherungspflicht des Eigentümers. Letztere ist jedoch bei außergewöhnlichen Witterungsumständen (z.B. mehr als Windstärke 8) eingeschränkt. Insgesamt geht es im Gegensatz zum traditionellen Verständnis von Hochwasserschutz nicht darum, die durch den Klimawandel verursachten extremen Ausprägungen des Wetters von den Gebäuden fernzuhalten, sondern die Gebäude selbst so zu verändern, dass sie den Extremwettereinflüssen besser standhalten können.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

Die Zusatzinvestitionen der Anpassung neuer, aber auch bestehender Gebäude an die zu erwartenden Klimaveränderungen sind nur überschlägig abschätzbar und belaufen sich laut Stern (2007) auf ein bis 10 % der gesamten Investitionen in Gebäude und Infrastruktur. Dabei beinhaltet die obere Grenze die Anpassung an vermehrte und stärkere Stürme und Hochwasser im Falle eines Temperaturanstiegs um 4°C bis zum Jahr 2100 (d.h. ohne Anpassungsmaßnahmen). Die durchschnittlichen Gebäudeschäden durch Sturm, Hagel und Starkregen betragen nach Grothmann et al. (2009) mit 15.000 Euro pro betroffenem Gebäude etwa ein Viertel aller klimabedingten Schäden (Sturmfluten und Überschwemmungen eingeschlossen), so dass für die Vorsorge gegen Stürme, Hagel und Starkregen bis zum Jahr 2080 von einem zusätzlichen Investitionsbedarf von 2,5 % der Gesamtinvestitionen in Gebäude auszugehen ist – mit einer geschätzten Spannbreite

zwischen 2 und 3 %. Da die Gesamtinvestitionen nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (DeStatis 2010) im Jahr 2008 52,4 Mrd. Euro betrugen, lassen sich daraus jährliche Anpassungskosten in Höhe von 1,05 bis 1,57 Mrd. Euro ableiten, entsprechend 0,04 bis 0,06 % des BIP.

Eine Quantifizierung der durch den Klimawandel und die damit einhergehende Intensivierung von Stürmen verursachten Schäden an Gebäuden ist sehr schwierig. Was die Schadenskosten angeht kann zwar auf Versicherungsdaten zurückgegriffen werden, aber es ist unklar, ob der dort feststellbare Anstieg der Schadensbeträge auf eine Zunahme der Intensität der Stürme oder der versicherten Werte zurückzuführen ist. Die durchschnittlichen Gebäudeschäden durch Sturm, Hagel und Starkregen betragen, wie bereits dargestellt, nach Grothmann et al. (2009) mit 15.000 Euro pro betroffenem Gebäude etwa ein Viertel aller klimabedingten Schäden (Sturmfluten und Überschwemmungen eingeschlossen), Es ist zu erwarten, dass die Schäden bei Leichtbauweise, wie sie vor allem bei öffentlichen und gewerblichen Bauten eingesetzt wird, oft wegen Totalverlusten deutlich höher ausfallen, als bei in traditionellem Massivbau errichteten Wohnungsbauten, an denen oft nur reparable Schäden entstehen. Stern (2007) und Ackerman und Stanton (2008) sind weitere Quellen, die Angaben über den durch den Klimawandel verursachten Anstieg der Schadenskosten machen. Stern (2007) geht dabei davon aus, dass ein Temperaturanstieg um 3°C in den USA zu einer Verdoppelung der gegenwärtigen Schadenskosten führen würde, womit die Schäden etwa 0,13 % des BIP betragen würden. Ackerman und Stanton (2008) gelangen dagegen bis 2100 und bei einem Temperaturanstieg um 5°C für die USA zu einer Schadenshöhe von insgesamt 422 Mrd. USD entsprechend 0,41 % des BIP. Allerdings handelt es sich dabei überwiegend um Schäden an Gebäuden anderer Bauweise und infolge von Hurrikans, die i.d.R. deutlich größer ausfallen als Sturmschäden hierzulande. In Europa, wo Hurrikans nicht beobachtet und Winterstürme weniger stark sind, wäre demgegenüber von einem klimabedingten Anstieg der Schadenskosten von Stürmen bis zum Jahr 2080 um 16 bis 68 % auszugehen, was in etwa 0,1 % des BIP entspräche (Stern 2007). 0,1 % des BIP oder mehr scheint also eine gute erste Näherung der Schäden zu sein, die der Klimawandel in diesem Kontext nach sich zieht.[39] Nicht alle diese (zusätzlichen) Schäden werden mit Hilfe der hier untersuchten Maßnahmen vermeidbar sein. Umgekehrt wird mit den Maßnahmen auch ein Teil der Schäden vermieden, die auch ohne Klimawandel auftreten würden. Wir gehen daher alles in allem von vermiedenen Schäden der Maßnahme in Höhe von 0,08 bis 0,2 % des BIP aus. Hinzu käme der Nutzen durch einen besseren Schutz von Menschen in und außerhalb (verminderter Trümmerflug) von Gebäuden sowie höherer Verfügbarkeit der Infrastruktur (z.B. wegen stabilerer Stromleitungen) und Investitionssicherheit (z.B. durch Vermeidung von Betriebsunterbrechungen).

[39] Darin enthalten ist auch eine niedrige zweistellige Zahl von Menschenleben, die jährlich aufgrund von Sturmschäden an Gebäuden zu beklagen ist und die mit einem Euro-Betrag in zweistelliger Millionenhöhe zu Buche schlägt.

## Beurteilung der Maßnahme

Angesichts der Nutzen-Kosten-Relation von 1,3:1 im ungünstigsten und 5:1 im günstigsten Fall scheint die Anpassung von Gebäuden an das verstärkte Auftreten von Stürmen, Hagel und Starkregen eine wirtschaftlich sinnvolle Anpassungsmaßnahme darzustellen, wenngleich einschränkend hinzugefügt werden muss, dass es sowohl auf der Kosten- als auch der Nutzenseite große Unsicherheiten gibt. Dennoch erscheint es gerade angesichts dieser Unsicherheiten als sinnvoll, zumindest die kostengünstigeren Maßnahmen durchzuführen. Das heißt, vor allem Neubauten sollten von vorne herein so geplant und ausgestaltet werden, dass Wind und Starkniederschläge ihnen möglichst wenig anhaben können. Auch auf Seiten der Bestandsgebäude gibt es Maßnahmen (z.B. Konstruktion von Dächern, Gebäudehülle, Rückstauventile seitens der Kanalisation), die vor allem anlässlich einer Sanierung relativ leicht umsetzbar sind. Dabei ist besonders zu bedenken, dass die auf Seiten der Kosten veranschlagten Geldsummen nur dazu ausreichen, alle Neubauten und pro Jahr maximal ein Prozent des Gebäudebestandes anzupassen. Es handelt sich also insgesamt um einen langfristigen Anpassungsprozess. Daher sollte mit dieser Anpassung möglichst bald begonnen werden, damit bis zum voraussichtlichen vollen Wirksamwerden der Klimaveränderungen ein möglichst großer Anteil der Gebäude geschützt ist. Für die Bestandsgebäude, die nicht rechtzeitig angepasst werden können oder für die die Anpassung zu aufwändig würde, sind ggf. Versicherungen zur Abdeckung verbleibender Risiken abzuschließen.

Als Anreizmechanismus für die Durchführung dieser Maßnahme ist aufgrund der Größe der möglichen Schäden und der grundsätzlichen Verantwortlichkeit der einzelnen Gebäudebesitzer eine Versicherungspflicht für Elementarschäden als besonders geeignet anzusehen (vgl. Kap. 3.3). Der Staat würde dabei ergänzend durch die Gestaltung der Rahmenbedingungen die Hausbesitzer indirekt dazu veranlassen ihre Gebäude dem Klimawandel anzupassen, da sie sonst für die abzuschließende Versicherung höhere Beiträge zahlen müssen. Dies kann durch Einflussnahme auf die einschlägigen Technischen Baubestimmungen oder Regeln erfolgen, da ein Versicherungsschutz i.d.R. nur dann besteht, wenn diese bei Errichtung oder Erneuerung eingehalten werden. Als Beispiele zu nennen sind die DIN 1055 Teil 4 „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil Windlasten“ oder die Fachregeln des Deutschen Dachdeckerhandwerks. Voraussetzung ist, dass die Versicherungsprämien risikoabhängig sind. Es kann dagegen nicht Aufgabe des Staates sein, sich an der Finanzierung der Anpassungsmaßnahmen zu beteiligen, da auch der Nutzen den Hausbesitzern zufällt.

### Tabelle 46: Auswertung der Maßnahme „Schutz von Gebäuden vor verstärkten Stürmen – Starkregen und Wind“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Schutz von Immobilienvermögen, wobei Schäden durch Sturm und Hagel i.d.R. nicht flächendeckend, sondern punktuell auftreten. |
| **Effektivität** | Mittel | Die Anpassung vor allem von Gebäuden im Bestand wird sich über einen längeren Zeitraum hinziehen. Ein vollständiger Schutz wird nie möglich sein. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Wenn der Staat sich auf die Vorgabe der Rahmenbedingungen beschränkt, sind Mitnahmeeffekte nicht zu erwarten. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die Maßnahme wird beim Neubau oder bei Bestandsgebäuden eingebaut und zeigt aber diesem Zeitpunkt ihre Wirkung. Die Wirkung ist konstant auf dem eingeplanten Schutzlevel. Eine Wirkung auf eine nachhaltige Entwicklung ist nicht erkennbar. |
| **Reichweite** | Regional bis national | Die Anpassung der Gebäude erfolgt lokal. Die Versicherungspflicht als Anreizinstrument muss überregional implementiert werden. |
| **Akzeptanz** | Niedrig bis hoch | Vor allem Besitzer von Häusern, die sich in einem schlechten Zustand befinden, werden für die Anpassung oder die Versicherung viel zahlen müssen. |
| **Regret/No-regret** | Low regret | Die meisten Maßnahmen erweisen sich auch unabhängig vom Klimawandel als vorteilhaft. |
| **Szenario-Variabilität** | stark | Die Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen und die dadurch verursachten Schäden hängen in besonderer Weise von der Ausprägung des Klimawandels ab. |

## 3.6 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe

### 3.6.1 Anpassungsmaßnahme „Information von Unternehmen zur Anpassung an den Klimawandel“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Obwohl der Klimawandel eine Tatsache ist und viele Menschen und Organisationen davon mit großer Wahrscheinlichkeit betroffen sein werden, stößt das Thema der *Anpassung* an den Klimawandel auf Seiten der Privatwirtschaft – von Ausnahmen abgesehen - bislang auf wenig Interesse. Ursachen für dieses Desinteresse sind, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels nur langsam und mit großer Zeitverzögerung signifikant auf das Wohlergehen der Menschen oder die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen auswirken und Aussagen über diese Auswirkungen gleichzeitig mit großer Unsicherheit behaftet sind. Das Thema wird daher kaum als strategischer Handlungsbedarf erkannt, zumal der vermeintliche oder tatsächliche Mangel an sicheren Informationen eine zusätzliche Hemmschwelle für die Auseinandersetzung mit dem Thema darstellt. Wenn es gelänge, diese Hemmschwelle zu senken, würden sich mehr Unternehmen, Verbände und ggf. auch Privatpersonen mit den möglichen Auswirkungen des Klimawandels beschäftigen und damit würde auch das Thema an Bedeutung gewinnen. Eine Möglichkeit, diese Hemmschwelle zu senken, besteht darin Informationen zum Thema einfach zugänglich zu machen, wie etwa die KomPass-Webseite (www.anpassung.net) und dort speziell der Klimalotsen des Umweltbundesamtes.

Grundsätzlich ist die Verfügbarkeit von Informationen Voraussetzung für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in allen Bereichen von Politik, Gesellschaft und Wirtschaft. Im Hinblick auf die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) gibt es aber Bereiche wie die Energie- und Wasserwirtschaft oder den Küstenschutz, die das Thema aus Gründen der dort üblichen langen Frist von Investitionen und aufgrund oftmals vorhandener einschlägiger Routinen (z.B. im Bereich des Hochwasser- und Küstenschutzes) schon heute sehr viel intensiver aufgreifen. Auch im Verkehrsbereich und in der Raumplanung (vgl. Einplanung von Poldern und Retentionsflächen) werden Anpassungserfordernisse vielfach in die Planung einbezogen. In anderen Sektoren wie der Land-, Forst- und Tourismuswirtschaft ist eine größere Neigung festzustellen, sich mit dem Klimawandel auseinander zu setzen, was sich durch die unmittelbare Betroffenheit dieser Sektoren erklären lasst. Schließlich wird sich die Versicherungswirtschaft seit einigen Jahren aufgrund wiederholt auftretender Großschäden ihrer besonderen Betroffenheit bewusst. In all diesen Fällen ist der Wissensstand schon heute relativ hoch, und die Hemmschwelle zur Auseinandersetzung mit dem Thema Anpassung entsprechend geringer. Im Gegensatz dazu ist diese Bereitschaft in der Mehrheit der Industrie- und Gewerbeunternehmen, die weniger oder nur indirekt vom Klimawandel sein betroffen werden, nur gering ausgeprägt. Viele Unternehmen haben eine – im Vergleich zum langfristig wirkenden Klimawandel - eher kurzfristige Geschäftsstrategie und tätigen überwiegend kurz- bis mittelfristige Investitionen (z.B. zehn Jahre bei Anlagen und zwanzig Jahre bei Gebäuden) bei denen Folgen des Klimawandels vermeintlich noch keine Rolle spielen. Weiter wird eine Auseinandersetzung von Unternehmen mit den Folgen des Klimawandels bislang kaum von institutionellen Anlegern als Voraussetzung für finanzielle Engagements angesehen.

Im Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel ist die Informationsbereitstellung für Industrie und Gewerbe insofern besonders relevant als sie die Voraussetzung für eine effektive und effiziente Anpassung darstellt. Aus dem gleichen Grund, weil die Information der eigentlichen Anpassungsentscheidung vorangehen muss, ist auch die Dringlichkeit der Maßnahme relativ hoch.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Es gibt eine Vielzahl von Literaturquellen und Internet-Seiten, die sich mit der Betroffenheit durch den Klimawandel und Maßnahmen zur Abwehr möglicher Schäden oder, seltener, der Nutzung daraus resultierender Chancen beschäftigen. Die Informationen, die auf diese Weise bereitgestellt werden, stammen oft aus Forschungsinstituten, die selbst nicht immer auf eine nutzungsorientierte Verbreitung hinwirken können. Verknüpft werden beide Seiten durch eine kleine Zahl von Mittlerorganisationen, wie dem Umweltbundesamt (UBA) auf nationaler Ebene, die die Informationen bewerten und so aufbereiten, dass mögliche Nutzer sie unmittelbar für ihre Anpassung an den Klimawandel verwenden können. Auf Seiten des UBA ist hier als zentrales Instrument die Webseite des Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung (KomPass) hervorzuheben.

Die Kosten der Einrichtung, des Betriebs und der Pflege der KomPass-Webseite werden vom UBA folgendermaßen beziffert:

**Tabelle 47: Kosten für Einrichtung, Betrieb und Pflege KomPass-Webseite**

| | |
|---|---|
| Einrichtung und Betrieb des Servers inkl. Content Management System durch ein Dienstleistungsunternehmen | 60.000 €/Jahr* |
| Redaktioneller Betrieb der KomPass-Webseite (einschl. Personal) | 180.000 €/Jahr* |
| Kosten der Datenbeschaffung und der Hinzufügung zusätzlicher Funktionalitäten (anteilig für KomPass) | 150.000 €/Jahr* |
| **Gesamtkosten (jährlich)** | **390.000 €/Jahr*** |

* Schätzungen des UBA für das Jahr 2009 (Zahlen für 2008 ähnlich; davor befand sich KomPass noch im Aufbau)

Am schwierigsten einschätzbar sind die Kosten der Datenbeschaffung, da die Erhebung von Daten meist nicht ausschließlich zur Verwendung auf der Webseite erfolgt. Stattdessen dienen sie vor allem der Verbesserung der Wissensbasis allgemein und werden auch auf anderen Wegen verbreitet. Für die fraglichen Projekte wurde versucht, den KomPass-relevanten Anteil abzuschätzen und die Projektbudgets damit zu gewichten.

Der Nutzen der koordinierten Informationsbereitstellung durch eine zentrale Organisation wie das UBA besteht in erster Linie darin, dass für einzelne Nutzer der Aufwand für die Informationsbeschaffung sinkt. Typischerweise würden Unternehmen aus Industrie und Gewerbe dafür die Dienste von Beratungsunternehmen in Anspruch nehmen. Natürlich ersetzt eine Informationsplattform wie KomPass keine individuelle Beratung, sondern kann nur die Informationen für eine erste, grundlegende Orientierung liefern. Die Aufbereitung der Informationen im Hinblick auf den jeweiligen Einzelfall und die (denkbaren)

Anpassungsmaßnahmen, muss dennoch von einem Dienstleister durchgeführt werden.[40] Insofern spart ein Informationsangebot wie die KomPass-Website nur einen Teil des Beratungsaufwandes. Zudem führt die kostenlosen Informationsbereitstellung dazu, dass das Wissen allgemein zugänglich ist und es so einzelnen Berater schwerer gemacht wird, durch einen Wissensvorsprung eine dominierende Stellung einzunehmen, was im Falle exklusiv verfügbaren oder schwer zugänglichen Wissens eher wahrscheinlich wäre.

Für die Abschätzung des Nutzens der KomPass-Website wird davon ausgegangen, dass durch die zentrale Informationsplattform etwa 20 bis 30 % der Beratungskosten eingespart werden können. Wird zudem davon ausgegangen, dass die Beratungskosten für eine Erstberatung zu möglichen Folgen des Klimawandels und möglichen Anpassungsoptionen insgesamt je nach Unternehmensgröße zwischen 2.000 und 20.000 Euro betragen und nur ein Teil der Unternehmen eine Beratung in Auftrag gibt, ergeben sich für alle in Deutschland ansässigen Unternehmen folgende Gesamtkosten.

**Tabelle 48: Kosten für Beratung**

| Anzahl der Beschäftigten | Anzahl der Unternehmen[1] | Anteil der Unternehmen mit Beratung[2] | Kosten der Beratung pro Unternehmen, geschätzt (in €) | Gesamtkosten der Beratung (in 1.000 €) |
|---|---|---|---|---|
| 1 – 9 | 878.896 | 1 % | 2.000 | 17.578 |
| 10 – 49 | 94.702 | 2 % | 5.000 | 9.470 |
| 50 – 249 | 23.306 | 5 % | 10.000 | 11.653 |
| 250 und mehr | 5.319 | 10 % | 20.000 | 10.638 |

[1] Verarbeitendes Gewerbe, Handel und Reparaturbetriebe im Jahr 2007 (Quelle: Destatis 2010)

[2] Eigene Schätzung

Insgesamt werden nach dieser Rechnung rund 50 Mio. Euro für die Beratung von Unternehmen zur Anpassung an den Klimawandel aufgewendet, von denen entsprechend der oben getroffenen Annahme etwa ein Viertel, d.h. 12,3 Mio. Euro durch die Informationsplattform eingespart werden. Werden diese Einsparungen als Nutzen angesehen, der im Verlauf der kommenden 10 Jahre anfällt, so ergibt sich ein Kosten-Nutzenverhältnis von 0,39 zu 1,23 Mio. Euro (pro Jahr), d.h. der Nutzen ist gut dreimal so hoch wie die Kosten. Auch wenn berücksichtigt wird, dass die getroffenen Annahmen auf der Nutzenseite mit zahlreichen Unsicherheiten verbunden sind, und die Annahmen entsprechend nach oben und unten variiert werden, bleibt das Ergebnis stabil nachdem die Nutzen die Kosten tendenziell übersteigen.

[40] Ebenfalls auf der KomPass-Webseite angebotene Entscheidungs- und Strategieentwicklungshilfen wie der „Klimalotse“ erlauben grundsätzlich auch die Entwicklung einer kompletten Anpassungsstrategie durch den Nutzer selbst (d.h. unabhängig von einem externen Berater). Dafür sind dann aber auf Seiten des Nutzers nennenswerte Ressourcen insbesondere hinsichtlich der benötigten Arbeitszeit aufzuwenden und als zusätzliche Kosten in Rechnung zu stellen.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Berechnung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der kostenlosen, zentralen Bereitstellung von Informationen zur Anpassung an den Klimawandel erweist sich selbst unter restriktiveren (als den oben angenommenen) Bedingungen zur Höhe der eingesparten Kosten (20 %) und des Anteils der Unternehmen, die eine Beratung in Anspruch nehmen (0,5 bis 5 %) als vorteilhaft. Lassen sich mehr Unternehmen beraten oder machen zusätzlich Unternehmen selbst von den Daten auf der Webseite Gebrauch, so steigt der Nutzen weiter.

Die Information über Auswirkungen des Klimawandels und die Implementierung möglicher Anpassungsmaßnahmen wurde hier erstmals als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe bewertet. Die grobe Schätzung bestätigt den allgemeinen Befund, wonach Informationsmaßnahmen als wirksam und besonders kosteneffizient angesehen werden können. Im vorliegenden Fall stellt sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis selbst unter restriktiven Annahmen als günstig dar. Da die Verfügbarkeit von Informationen außerdem eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung von Anpassungsstrategien und die Planung und Umsetzung weiterer Maßnahmen ist, wird die Maßnahme als hoch relevant eingestuft.

An dieser Einschätzung ändert sich auch dann nichts, wenn berücksichtigt wird, dass es sich um eine regret-Maßnahme handelt. Da Informationsmaßnahmen nur eine kurze Wirkdauer haben und die Wirkung der Information nach kurzer Zeit stark nachlässt, wäre der Nutzen der Informationsplattform erheblich geringer, falls dass der Klimawandel später einträte oder geringer ausfiele als erwartet, oder falls das sich verändernde Klima für die fraglichen Unternehmen wesentlich geringere Schäden nach sich zöge. Allerdings erscheint der regret-Charakter dieser Maßnahme als leicht verkraftbar, weil die aufzuwendenden Kosten im Vergleich zu anderen Maßnahmen sehr gering sind.

Die Akzeptanz dieser Maßnahme kann als unproblematisch angesehen werden, da die Maßnahme den Nutzer – selbst unter Berücksichtigung der Finanzierung aus öffentlichen Mitteln – wenig kostet und keinen unmittelbaren Einfluss auf sein Verhalten ausübt.

Schließlich stellt sich die Frage, ob solche Informationssysteme vom Staat finanziert werden müssen, oder ob solche Informationen auch durch private Akteure auf eigene Initiative zusammengestellt und verbreitet werden könnten. Grundsätzlich ist dies auch denkbar, und es ist zu erwarten dass sich im Zeitverlauf dezidierte Beratungsangebote („Climate-Proofing“) entwickeln. Andererseits gibt es starke Argumente für eine Rolle der öffentlichen Hand: zum einen hat Information Charakteristika eines öffentlichen Gutes, was dagegen spricht, dass ein privater Anbieter in gleichem Umfang und gleicher Qualität Informationen anbieten würde. Zum anderen profitiert die zentrale Bereitstellung durch das UBA von Skaleneffekten und zahlreichen Synergien mit anderen laufenden Arbeiten des UBA, wodurch es dem UBA möglich ist die Dienstleistung günstiger zu erbringen als privaten Anbietern.

### Tabelle 49: Auswertung der Maßnahme „Information von Unternehmen zu Klimaanpassung“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | (Nice-to-.have) | Zwar kein Need-to-have, da kein absolutes Schutzgut betroffen, aber Voraussetzung für das Ergreifen aller anderen Maßnahmen. |
| **Effektivität** | Mittel | Notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung für das Ergreifen einer Vielzahl von Maßnahmen. |
| **Mitnahmeeffekte** | Gering | Unterstützung durch den Staat sinnvoll; Mitnahmeeffekte wahrscheinlich, aber gering. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Bei dem Informationssystem handelt es sich um eine Art Meta-Maßnahme, die nicht direkt wirkt, sondern andere Maßnahmen erleichtert. |
| **Reichweite** | National | Das Informationssystem kann regional oder national angelegt sein. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Da das Instrument Unternehmen bei der Anpassung unterstützt, sollte es eine hohe Akzeptanz aufweisen; ob es tatsächlich genutzt wird, hängt. Einerseits davon ab, wie die Information angeboten wird, andererseits davon, als wie relevant das Problem von den Betroffenen angesehen wird. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Das Informationssystem ist nur sinnvoll, wenn es tatsächlich zu einer nennenswerten Klimaveränderung kommt. Wenn dies nicht der Fall wäre, wären die versunkenen Kosten allerdings gering. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Mit zunehmender Klimaveränderung steigt der Anpassungs- und damit auch der Informationsbedarf |

### 3.6.2 Anpassungsmaßnahme „Vermeidung von hitzebedingten Produktivitätseinbußen durch Klimatisierung“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Unternehmen können von den Folgen des Klimawandels in Form von verschiedenen Klimaextremen (z.B. Jahre mit höherer Sommertemperatur) und verschiedenen extremeren oder häufigeren Wetterextremen (z.B. Hitzewellen) getroffen werden. Die Folge des Klimawandels jedoch, von der *alle* Unternehmen flächendeckend betroffen sind, ist der Anstieg der Temperaturen und die damit verbundenen Produktivitätseinbußen bei den Arbeitskräften und teilweise auch bei Maschinen und Infrastruktur im Sommer. Diesen Einbußen wird auch heute schon dadurch entgegengewirkt, dass durch die Verspiegelung oder Verschattung von Glasflächen oder die Wärmedämmung der Gebäudehülle die Wärme von vorneherein am Eindringen in die Gebäude gehindert wird. Dem gegenüber steht der rein defensive Ansatz der Kühlung von Räumen mittels Klimaanlagen, wobei die aktive Kühlung teurer ist als integrierte Lösungen. Dennoch stellt die Klimatisierung der Innenräume oft das Mittel der Wahl dar, ein gleichmäßiges, komfortables Temperaturniveau sicherzustellen, soweit dies durch die beschriebenen konstruktiven Maßnahmen nicht erreicht wird. Darüber hinaus stellt die Klimatisierung im Kontext des Klimawandels ein „zweischneidiges Schwert“ dar, da sie einerseits die Menschen vom Temperaturanstieg entlastet, andererseits durch den damit einhergehenden Energieverbrauch meistens selbst zum Klimawandel beiträgt. Letzteres ist gleichzeitig ein wichtiger Grund, warum die zunehmende Klimatisierung als Folge des Klimawandels in verschiedenen Studien bereits untersucht wurde und die Datenlage dementsprechend relativ gut ist. Die gute Datenlage und die Erkenntnis, dass die Klimatisierung im Kontext der Anpassung in jedem Fall eine wichtige Rolle spielen wird, ist für uns Grund genug, Kosten und Nutzen dieses Ansatzes genauer zu analysieren.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

Die Kosten der Vermeidung von Produktivitätseinbußen durch Klimatisierung umfassen den (Ein-)Bau und den Betrieb von Klimaanlagen. Dabei ist zu beachten, dass der in den kommenden Jahrzehnten zu erwartende Anstieg beim Einbau von Klimaanlagen in Industrie und Gewerbe und den Kosten ihres Betriebs nur zum Teil unmittelbar mit der Klimaerwärmung im Zusammenhang steht. Der Bedarf an zusätzlichen Klimaanlagen ergibt sich neben dem Temperaturanstieg auch aus der generellen Tendenz zum Einbau von Klimaanlagen in grundsanierten oder neuen Gebäuden vor allem des Dienstleistungssektors aber auch der Industrie.[41] Außerdem ist generell ein Anstieg der in Anspruch genommenen und zu kühlenden Flächen zu verzeichnen. Auf Seiten des Betriebs darf dementsprechend im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel nur der Energieverbrauch

[41] Gegenwärtig sind in Deutschland von den Büro- und Verwaltungsgebäuden ca. 10 % vollklimatisiert, ein gutes Drittel teilklimatisiert und etwas mehr als 50 % nicht klimatisiert. (Werner et al. 2008)

berücksichtigt werden, der tatsächlich auf den damit einhergehenden Temperaturanstieg (und nicht auf die generelle Zunahme der klimatisierten Fläche) zurückzuführen ist.

Im EU-Projekt ADAM (Jochem & Schade 2009) wurden unter Berücksichtigung dieser Unterscheidung für die Kompensation des Klimawandels unter Annahme eines Temperaturanstiegs um vier Grad bis zum Jahr 2100 folgende Aufwendungen prognostiziert. In Deutschland wird im Dienstleistungssektor im den Zeitraum von 2005 bis 2050 der Stromverbrauch voraussichtlich von 124 auf 179 Mrd. kWh pro Jahr ansteigen. Davon entfallen im Jahr 2050 3 %, d.h. 5,4 Mrd. kWh auf den Ausgleich des Temperaturanstiegs. Unter Berücksichtigung von Lerneffekten und Effizienzzugewinnen entspricht dies zusätzlichen jährlichen Stromkosten in Höhe von 745 Mio. Euro. Hinzu kommen Investitionskosten in Höhe von 256 Mio. Euro[42], zusammen also Kosten in Höhe von 1,002 Mrd. Euro pro Jahr. In der Industrie ist der Stromverbrauch zwar mit 295 Mrd. kWh insgesamt deutlich höher als im Dienstleistungssektor, mit 0,1 % bzw. 0,31 Mrd. kWh ist aber nur ein recht kleiner Teil davon durch die Klimaerwärmung und die dadurch bedingte Kühlung verursacht. Das entspricht für das Jahr 2050 und den entsprechenden Temperaturanstieg zusätzlichen jährlichen Betriebskosten in Höhe von 22,6 Mio. Euro, zu denen 17 Mio. Euro jährlich für die entsprechenden Investitionen hinzuzuzählen sind – insgesamt also rund 40 Mio. Euro pro Jahr. Da die Stromproduktion (im 4-Grad-Referenzszenario ohne nennenswerten Klimaschutz) zum großen Teil auf fossilen Energieträgern beruht, fallen für die Herstellung des Stroms zusätzlich noch die Kosten für entsprechende Treibhausgasemissionszertifikate an. Unter Zugrundelegung des derzeitigen deutschen Strommixes (mit 600g $CO_2$ pro kWh) entstehen bei der Produktion der angegebenen 5,71 Mrd. kWh Strom 3,43 Mio. Tonnen $CO_2$-Emissionen, für die unter der Annahme eines Preises von 30 Euro pro Tonne $CO_2$ noch einmal 103 Mio. Euro hinzuzurechnen wären. Zusammengenommen betragen die Kosten für die Anpassung mittels Klimaanlagen an den bis 2050 erfolgenden Temperaturanstieg im Industrie- und Dienstleistungssektor 1,145 Mrd. Euro jährlich; das entspricht 0,03 % des für 2050 erwarteten BIP.

Die Berechnung des durch den vermehrten Einsatz von Klimaanlagen erzielten Nutzens erfolgte unter der Annahme, dass die durch die Klimaerwärmung und die entsprechende Aufheizung der Arbeitsstätten verursachten Produktivitätseinbußen vollständig kompensiert werden können. Um diese Produktivitätseinbußen zu berechnen, wurde anhand von Spekat et al. (2007) zunächst für 6 repräsentative deutsche Städte[43] die durchschnittliche Zunahme der jährlichen Anzahl von Sommer- und heißen Tage[44] bis zum Jahr 2100 bestimmt. Für die durchschnittliche Zahl von Sommer- und heißen Tage in Deutschland wurden dann auf der Grundlage von Daten zur Leistungsminderung von Arbeitskräften (Hübler & Klepper 2007) die Produktivitätseinbußen ermittelt, die die deutsche Wirtschaft angesichts der Klimaerwärmung hinzunehmen hätte. Wir gingen demzufolge davon aus, dass die Produktivität an einem Sommer- (aber nicht heißen) Tag (mit einer durchschnittlichen

---

[42] 256 Mio. Euro entsprechen 32 % der von Jochem und Schade (2009) ausgewiesenen 796 Mio. Euro für Westeuropa. Der Anteil wurde entsprechend dem Anteil Deutschlands am westeuropäischen Stromverbrauch berechnet.

[43] Das sind Berlin, Leipzig, München, Karlsruhe, Köln und Hannover

[44] Sommer- und heiße Tage sind Tage, an denen die Höchsttemperatur 25 bzw. 30°C überschreitet.

Maximaltemperatur von 27,5 °C) um 4 % und an einem heißen Tag (mit einer durchschnittlichen Maximaltemperatur von 32,5 °C) um 9 % reduziert ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 50 zusammengefasst.

**Tabelle 50: Zunahme von Sommer- und heißen Tagen in verschiedenen Klimaszenarien bis 2100 und daraus ohne Gegenmaßnahmen resultierende Produktivitätsverluste**

| | 1990 | Szenario für 2100 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | A1B | A2 | B1 |
| **Anzahl Tage** | | | | |
| Normale Tage | 328,8 | 302,5 | 298,7 | 301,7 |
| Sommertage (ohne heiße Tage) | 29,7 | 45,8 | 45,4 | 47,3 |
| Heiße Tage | 6,5 | 16,7 | 20,9 | 16,0 |
| **Produktivität** | | | | |
| Stand | 99,51% | 99,09% | 98,99% | 99,09% |
| Verlust (gegenüber 1990) | | 0,43% | 0,53% | 0,43% |

Für die verschiedenen Klimaszenarien ergeben sich aufgrund der größeren Anzahl von Sommer- und heißen Tagen Produktivitätsverluste zwischen 0,43 und 0,53 %.[45] Diese Werte stehen in guter Übereinstimmung mit einem Verlust von 0,48 %, der von Hübler & Klepper (2007) für das Klimaszenario A1B bestimmt wurde. Würden alle Arbeitskräfte in Gebäuden arbeiten, entspräche dieser Anteil auch dem Produktivitätsverlust in der gesamten Wirtschaft. Tatsächlich beträgt der Anteil der in Gebäuden tätigen Arbeitskräfte nur 90 % (Ecoplan 2007), so dass die mit Hilfe von Klimaanlagen kompensierbaren Produktivitätsverluste nur zwischen 0,38 und 0,47 % liegen. Die angegebenen Szenarien implizieren bis zum Jahr 2100 Temperaturanstiege um 2,9 °C (A1B), 3,8 °C (A2) und 1,9 °C (B1). Davon ist das Szenario A2 grundsätzlich am ehesten mit dem 4-Grad-Szenario der für die Kostenanalyse verwendeten ADAM-Studie vergleichbar. Allerdings ist die Zeitperspektive in der ADAM-Studie mit 2050 nur halb so lange wie das Jahr 2100 in der produktivitätsrelevanten Klimastudie. Um beide Ansätze vergleichbar zu machen, gehen wir so vor, dass wir die Produktivität entsprechend dem Temperaturanstieg bis 2050 im A2-Szenario herunter rechnen. Nach IPCC (2007) beträgt der Temperaturanstieg in diesem Fall 1,4 °C. Geht man weiter davon aus, dass sich die Anzahl der Sommer- und heißen Tage proportional zu diesem Anstieg der Durchschnittstemperatur verändern wird, dann resultiert daraus ein Produktivitätsverlust bis 2050 um 0,19 %.

Zu einem auf den ersten Blick deutlich anderen Ergebnis kommt Ecoplan (2007) mit ihrer Einschätzung, dass die hitzebedingte Produktivitätseinbuße bis zum Jahr 2050 mit 0,002 % vom BIP kaum merklich ist und erst im Jahr 2100 0,11 % erreicht. Allerdings wird dabei angenommen, dass die Indoor-Arbeitsplätze (die in der obigen Analyse ausschließlich betrachtet werden) nicht berücksichtigt werden müssen, da hier die zusätzliche

[45] Die Produktivität von 99,51 % im Referenzfall gibt an, dass schon 1990 die Produktivität aufgrund von Sommer- und heißen Tagen um 0,49 % reduziert gewesen wäre, wenn keine Kühlung der Arbeitsplätze stattgefunden hätte.

klimabedingte Wärmeeinwirkung durch Klimatisierung kompensiert wird. Es werden also nur die Outdoor-Arbeitsplätze betrachtet, die 10 bis 15 % der gesamten Wertschöpfung ausmachen. Außerdem sind Hitzeeinwirkungen, die deutlich weniger stark als die des Sommers 2003 sind, unterrepräsentiert, da nur die Wahrscheinlichkeit eines 2003er Sommers als Referenz angenommen wird – und die ist im Jahr 2050 um mehr als den Faktor 10 geringer als in 2100. Würden beide Unterschiede berücksichtigt und kompensiert, so würde auch die Ecoplan-Studie zu einer Produktivitätseinbuße für 2100 von über 0,5 % und für 2050 von ungefähr 0,1 gelangen – beides Werte, die von den oben berechneten nicht stark differieren.

### Beurteilung der Maßnahme

Bei der Klimatisierung von Büroräumen und Produktionsstätten handelt es sich um eine rein defensive Maßnahme, bei der nicht versucht wird die Aufheizung der Räume von vorne herein zu verhindern, sondern die einströmende Hitze lediglich wieder nach draußen transportiert wird. In dieser Hinsicht sind Klimaanlagen zwar effektiv, aber nicht effizient (weil mit hohem Energieaufwand verbunden). Ein wichtiger Nachteil besteht außerdem darin, dass diese Wirkung i.d.R. mit dem Ausstoß von Treibhausgasen verbunden ist, der die Klimaerwärmung weiter voran treibt. Klimaanlagen wird dennoch vor allem in der näheren Zukunft noch eine große Bedeutung zukommen, weil vor allem für Gebäude im Bestand nur wenige andere Anpassungsalternativen zur Verfügung stehen und weil es auch nach der Implementierung baulicher Maßnahmen wie Verschattung oder Isolierung die Notwendigkeit gibt, Wärmespitzen aus den Gebäuden abzuführen.

Unabhängig von der technischen Bedeutung von Klimaanlagen für die Kühlung des Inneren von Gebäuden, stellen die Kosten der Implementierung von Klimaanlagen für die übergeordnete Frage nach dem Nutzen-Kosten-Verhältnis der Kühlung von Industrie- und Gewerbebauten einen interessanten Referenzwert dar. Erstens lassen sich die Kosten dieser End-of-pipe-Technologie wegen ihrer Unkompliziertheit relativ leicht auf einen größeren Gebäudebestand hochrechnen. Zweitens führt die Klimatisierung im Gegensatz zu integrierten Technologien immer zu einer Erhöhung der Kosten. Eine Win-win-Situation ist ausgeschlossen. Daher können wir davon ausgehen, dass die Ausstattung mit Klimaanlagen relativ hohe Kosten verursacht, die durch die Kombination mit anderen Technikansätzen wahrscheinlich unterschritten, aber kaum überschritten werden kann. Sie stellen kostenmäßig also eine Art „worst case“ dar.

Auf der Nutzenseite ist der (vermiedene) Produktivitätsrückgang von 0,19 % (entsprechend 7,4 Mrd. Euro) Ausdruck des IPCC-Szenarios A2 mit einem Temperaturanstieg von knapp 4°C bis zum Jahr 2100. Die 4°C liegen zwar im Gesamtbereich der Schätzungen des Temperaturanstiegs (zwischen 1 und 7°C) etwa in der Mitte, das A2 Szenario zählt aber zu denjenigen mit überdurchschnittlichem Temperaturanstieg. D.h. die Wahrscheinlichkeit, dass der Temperaturanstieg schwächer ausfällt als in dem betrachteten Szenario, ist größer als die, dass er stärker ausfällt. Hinzu kommt, dass ein Temperaturanstieg in der Umgebung einer Industriehalle oder eines Bürogebäudes sich nicht unmittelbar und in gleichem Ausmaß auf die Temperatur der Arbeitsräume auswirken muss.

Sowohl für die Kosten als auch den Nutzen liegen die ermittelten Werte also eher an der oberen Grenze der Wahrscheinlichkeit. Hinsichtlich des auf Basis der oben berechneten Zahlen ermittelten Nutzen-Kosten-Verhältnisses von 0,19% zu 0,03% bzw. 6,5 zu 1 müsste

der tatsächliche Nutzen also um mehr als 80 % geringer ausfallen, damit die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme in Frage gestellt würde. Das erscheint sehr unwahrscheinlich, zumal bei einem geringeren Temperaturanstieg auch die Betriebskosten der Klimaanlagen sinken würden. Ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 3 zu 1 sollte also in keinem Fall unterschritten werden. Das Ergebnis der Nutzen-Kosten-Analyse ist damit zwar stark vom angenommenen bzw. tatsächlich eintretenden Klimaszenario abhängig, die Maßnahme ist aber auf jeden Fall als sinnvoll anzusehen.

Als vorteilhaft wirkt sich in diesem Zusammenhang auch aus, dass es sich bei der Klimatisierung um eine low-regret Maßnahme handelt. Klimaanlagen werden nämlich nicht nur aus Anlass des Klimawandels eingebaut. Außerdem haben sie eine Nutzungsdauer von maximal 20 Jahren, so dass Investitionsentscheidungen noch einmal revidiert werden können, bevor es ggf. zu einem stärkeren oder schwächeren Anstieg der Temperaturen kommt.

Dem Staat kommt in diesem Zusammenhang nur die Rolle zu Rahmenbedingungen zu setzen. Dazu gehört in Deutschland der Arbeitsschutz, der das Arbeiten in zu heißen Räumen verbietet. Darüber hinaus zeigen die Berechnungen deutlich, dass es im Interesse der Unternehmer selbst liegt und sich wirtschaftlich rechnet, die Produktivität der Arbeitnehmer durch die Kühlung der Arbeitsräume aufrecht zu erhalten. Eine Unterstützung durch den Staat in Form der Subventionierung von Klimaanlagen ist auf jeden Fall abzulehnen, da dies zu erheblichen Mitnahmeeffekten führen würde. Ohne staatliche Subventionierung sind diese Mitnahmeeffekte dagegen nicht zu befürchten.

### Tabelle 51: Auswertung der Maßnahme „Vermeidung von Produktivitätseinbußen durch Kühlung“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Auf dem Spiel steht kein absolutes Schutzgut, aber die Produktivität und damit die Wohlfahrt einer ganzen Wirtschaft. |
| **Effektivität** | Mittel | Klimaanlagen sind wirksam, aber nicht effizient, zumal sie ihrerseits den Klimawandel noch beschleunigen. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Der Staat ist hier als Akteur nur am Rande (Rahmenbedingungen) gefragt, daher keine Mitnahmeeffekte. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Bei „klassischer“ Kühlung über Klimaanlagen behindert die Maßnahme die Entwicklung und den Einsatz von innovativen Kühlungskonzepten. Auf andere Ansätze, wie solare Kühlungsanlagen oder Kühldecken und –wände trifft dies nicht zu. |
| **Reichweite** | Lokal | Hitzeabwehr erfolgt auf unternehmerischer Ebene vor Ort. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Bei Unternehmern, weil die Produktivität erhalten bleibt; bei Arbeitnehmern wegen angenehmerer Arbeitsbedingungen. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Weil Klimatisierung meist auch unabhängig vom Klimawandel erfolgt. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Der Bedarf an Hitzeabwehr hängt stark vom eintretenden Klimaszenario ab. |

## 3.7 Handlungsfeld Gesundheit

### 3.7.1 Anpassungsmaßnahme „Hitzewarnsystem“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Ein Hitzewarnsystem dient zur Reaktion auf steigende Maximaltemperaturen, eine erhöhte Anzahl von heißen Tagen und Hitzewellen. Diese Auswirkungen treten nach IPCC (2007) aufgrund des Klimawandels mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 – 99 % in Mitteleuropa ein. Als Anpassungsmaßnahme wird der Aufbau eines Hitzewarnsystems betrachtet. Auf der Basis vorliegender Wettervorhersagen soll dieses besonders gefährdeten Gruppen (vor allem Personen über 75 Jahre und Kranke) bei hitzeangepasstem Verhalten unterstützen, etwa indem in Medien auf bevorstehende Hitzewellen hingewiesen wird und Ratschläge für angepasste Verhaltensweisen gegeben werden. Ein Beispiel für ein solches System ist das Philadelphia Hot Weather Heat Watch/Warning System (PHWW). Neben der Ankündigung der zu erwartenden Hitzewelle und Empfehlungen zu angepassten Verhaltensweisen ruft das System Angehörige und Bekannte dazu auf, besonders gefährdete Personen täglich zu besuchen und über hitzeangepasstes Verhalten zu informieren bzw. dazu zu animieren. Eine Telefonhotline dient zur vertieften Informationsvermittlung. Neben allgemeinen Warnungen über die Medien werden gezielt Alten- und Pflegeheime und Krankenhäuser verständigt. Die Angestellten dieser Einrichtungen handeln dann anhand ausgearbeiteter Aktionspläne. Notdienste, wie Feuerwehr, sollen bei einer ausgegebenen Warnung ihr Personal aufstocken, um auf eine erhöhte Nachfrage reagieren zu können (vgl. Ebi et al. 2004).

Bei den vorhandenen Hitzewarnsystemen in Deutschland finden sich ähnliche Elemente. Es werden Daten an die Medien weitergegeben, darüber hinaus werden Landesbehörden und Pflege- bzw. Behinderteneinrichtungen informiert (vgl. KVH 2010). Der Empfängerkreis lässt sich dabei jederzeit ausweiten. Die Teilnahme an den Hitzewarnsystemen ist dabei auf Länderebene unterschiedlich geregelt; teilweise ist es den Pflegeeinrichtungen freigestellt, ob sie sich an das System anschließen lassen (z.B. Rheinland-Pfalz).

Eine Maßnahme, die in Deutschland bisher kaum diskutiert wurde, ist die Einrichtung klimatisierter Zentren. Ebi et al. (2004) erwähnen, dass im Rahmen des PHWW die Öffnungszeiten von klimatisierten Seniorenzentren ausgedehnt werden sollen. In deutschen Publikationen finden sich keine Hinweise auf solche Maßnahmen.

Die Anpassungsmaßnahme fällt in die Handlungsfelder Bevölkerungsschutz und Gesundheit. Die Finanzierung der Anpassungsmaßnahme liegt vollständig in der öffentlichen Hand. Vollzogen wird die Maßnahme auf Ebene der Bundesländer. Eine spezielle Vollzugsstelle ist nicht notwendig, stattdessen können die Aufgaben von bestehenden Institutionen übernommen werden. Der zusätzliche Aufwand und die Kosten bspw. für die Erfassung der relevanten Adressaten, die Aufbereitung von Informationsmaterial und den Aufbau von Kommunikationsroutinen lassen sich nur grob qualitativ schätzen, erscheinen aber insgesamt als gering. Zu diskutieren ist, ob eine Pflicht zum Anschluss an Hitzewarnsysteme für bestimmte Institutionen (wie Alten- und Pflegeheime oder Krankenhäuser) sinnvoll erscheint. Darüber hinaus müssen die betroffenen Institutionen Maßnahmenpläne entwickeln, um auf verschiedene Warnungen reagieren zu können.

Die Anpassungsmaßnahme hat grundsätzlich eine lange Lebensdauer, da einmal etablierte Strukturen über Jahre hinweg funktionieren. Allerdings wird eine ständige Weiterentwicklung nötig, um die Informationsroutinen an geändertes Verhalten der Zielgruppen anzupassen, z.B. durch Berücksichtigung neuer Medien und Kommunikationswege. Zudem ist gerade in der Anfangsphase erhöhter Aufwand für Training und Beratung nötig, um hitzeangepasste Verhaltensweisen zu etablieren und Routinen einzuüben. Auch in der Folge sind regelmäßige Wiederholungen sinnvoll, da Maßnahmen zur Information und Aufklärung der Bevölkerung typischerweise eine sehr kurze Wirkungsdauer von nur wenigen Monaten haben, d.h. der Effekt der Informationsvermittlung nutzt sich schnell ab. Die Informationsvermittlung muss daher regelmäßig wiederholt werden, um den gewünschten Effekt zu erhalten.

Die Maßnahme kann schnell umgesetzt werden und die Wirkung stellt sich nach einer kurzen Einführungsphase unmittelbar ein.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Bei der Berechnung des primären Nutzens der Maßnahme wird auf die Berechnung der Schadenskosten durch Hitzewellen von Huebler & Keppler (2007) zurückgegriffen, ergänzt durch eigene Berechnungen.

Hübler & Klepper (2007) untersuchen die drei Klimaszenarien (IPCC-Szenarien: B1, A1B, A2) und zeigen auf, dass für den Zeitraum 2071-2100 bei allen drei Szenarien eine deutliche Zunahme der Tage mit starker oder extremer Hitzebelastung gegenüber dem Kontrolllauf (1971 bis 2000) um das Zwei- bis Fünffache zu erkennen ist. Alle drei Szenarien ergeben, dass die Anzahl der Tage mit Hitzebelastung pro Jahr im Norden Deutschlands an der Küste um einen Tag zunehmen wird (gegenüber dem Zeitraum 1971-2000). Für den Süden Deutschlands gehen die Aussagen auseinander: im günstigen Fall (Szenario B1) steigt die Anzahl an Tagen mit Hitzebelastung um 18 pro Jahr, im ungünstigen Fall (Szenarien A1B und A2) um 25 Tage.

Hübler & Klepper (2007) definieren anhand der Hitzewelle von 2003 Sterblichkeitsraten für die verschiedenen Temperaturklassen der gefühlten Temperatur. Bei mäßiger Wärmebelastung wird eine Zunahme der Sterblichkeit um ca. 6,6 %, bei starker Wärmebelastung um 9,3 % und bei extrem starker Wärmebelastung um rund 12 % angenommen. Durch die Verbindung der Temperaturdaten des IPCC und der Sterblichkeitsraten auf Basis der Hitzewelle von 2003 ergeben sich für die Periode 2071-2100 (durch exponentielle Extrapolation) ca. 17.000 vorzeitige Todesfälle durch Hitze pro Jahr in Deutschland. Das von Hübler & Keppler (2007) verwendete Modell geht von ca. 4.500 Todesfällen heute aus. Die Zahl der Opfer nimmt demnach um ca. 12.500 jährlich zu. Dieser Zuwachs ergibt sich sowohl aus der höheren Zahl von Hitzetagen (ca. 5.500), als auch durch die prognostizierte demografische Entwicklung. Aufgrund der demografischen Entwicklung steigt der Anteil älterer Menschen, wodurch allein schon die Zahl der Hitzetoten (selbst beim heutigen Temperaturniveau) um ca. 7.000 steigen würde. Huebler & Keppler (2007) verwenden dabei Prognosen der demografischen Entwicklung bis 2050, da längerfristige Daten nicht vorlagen.

Wreford (2007) gibt an, dass eine verhaltensorientierte Anpassung durch Hitzewarnsysteme und darauf aufbauende Maßnahmen, wie Hitzeaktionspläne etc. die Zahl der Hitzetoten bzw. das Ausmaß der hitzebedingten Gesundheitsschäden um 30 % verringern kann. Dabei

nehmen die Autoren einen Lerneffekt von 50 % an, d.h. 50 % der möglichen Maßnahmen werden ergriffen.

Hitzewarnsysteme und dazugehörige Maßnahmen wie Hitzeaktionspläne könnten somit 30 % der projizierten 17.000 hitzebedingten Todesfälle in Deutschland vermeiden, d.h. rund 5.000 vermiedene Todesfälle pro Jahr.

**Tabelle 52: Anzahl der vermiedenen Hitzetoten durch Hitzewarnsystem (2071-2100)**

| | Anzahl Hitzetote (gerundet) |
|---|---|
| Hitzetote (2071-2100) | 17.000 |
| heute | 4.500 |
| Zusätzlich (2071-2100) | 12.500 |
| Vermeidung von 30% durch Hitzewarnsystem | 5.000 |

Für die Monetarisierung kommt das „value of life year"-Konzept (VOLY) zum Einsatz, das die verlorenen Lebensjahre mit Geldwerten bemisst. Dieser Ansatz ist hier besser geeignet als das „Value of statistical life"-Konzept (VSL), da das VSL standardmäßig von einem Verlust von 40 Lebensjahren ausgeht (vgl. Ciscar 2009). Hitzebedingte Todesfälle sind jedoch besonders bei Menschen über 75 Jahren zu erwarten. Siehe zur Monetarisierung von Todesfällen auch den Exkurs auf der nächsten Seite.

Aufbauend auf Ergebnissen des NEWEXT-Forschungsvorhabens gehen wir von einem VOLY von 59.000 € pro verlorenem Lebensjahr aus (vgl. Markandya et al. 2004). Für die Berechnung wird analog zum PESETA-Forschungsprojekt ein durchschnittlicher Verlust an Lebensdauer von acht Jahren angenommen (vgl. Ciscar 2009). Bei 5.000 vermiedenen Todesfällen wären dies also 40.000 Lebensjahre, was einem monetarisierten Nutzen von 2,36 Mrd. € pro Jahr entspricht (2071-2100).

Über die reinen Hitzetoten hinaus haben Hübler & Klepper die hitzebedingten Krankenhauskosten im Jahresdurchschnitt 2071-2100 berechnet. Sie gehen dabei von 150.000 hitzebedingten Krankenhauseinweisungen pro Jahr für 2071-2100 aus (gegenüber derzeitigen hitzebedingten Krankenhauseinweisungen von 24.500). Dabei sind Änderungen der Altersstruktur und der Bevölkerungsentwicklung berücksichtigt. Da für die Behandlungskosten von hitzebedingten Krankheiten keine spezifischen Angaben vorliegen, verwenden sie für die Monetarisierung die durchschnittlichen Krankenhauskosten in Deutschland.

Auf diese Weise lassen sich die Kosten im Zeitraum 2071-2100 auf 495 Mio. € pro Jahr schätzen. Wie bei den hitzebedingten Todesfällen soll hier davon ausgegangen werden, dass verhaltensorientierte Anpassung die Krankenhauseinweisungen um 30 % verringern kann (vgl. Wreford 2007). Unter dieser Annahme führen Hitzewarnsysteme und angeschlossene Maßnahmen zu Einsparungen von 149 Mio. € pro Jahr. Sowohl die Krankenhauskosten als auch das VOLY-Konzept beziehen sich auf das heutige Preisniveau. Die Verwendung von Hitzewarnsystemen liefert damit einen Nutzen von insgesamt 2,5 Mrd. € pro Jahr in Form vermiedener hitzebedingter Todesfälle und Krankenhauseinweisungen, wobei vermiedene Todesfälle den Löwenanteil des Nutzens ausmachen. Der geschätzte

Nutzen bezieht sich auf die prognostizierten Wetterverhältnisse im Zeitraum 2071-2100. Für frühere Jahre liegt der Nutzen niedriger, da auch die Zahl der Hitzetage geringer ausfällt.

### Anwendung des 'Value of life years lost' (VOLY)

Wenn es in einer Kosten-Nutzen-Analyse nötig wird, Todesfälle zu monetarisieren, dann kommen Grössen wie der 'Value of statistical Life' (VSL) oder der 'Value of life years lost' (VOLY) zum Einsatz. Diese stellen den aktuellen wissenschaftlichen Stand zum einzusetzenden Wert bei der Berechnung externer Kosten (oder deren Vermeidung) für verlorene Lebensjahre dar. Der aktuell verwendete statistische Wert des Lebens beträgt für Deutschland 1,66 Mio. Euro setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

1. Direkte und indirekte ökonomischen Kosten (10% des VSL, 0,166 Mio. Euro)

2. Verlust an Lebensqualität (90% des VSL, also 1,5 Mio. Euro).

**Direkte und indirekte ökonomischen Kosten**

Die direkten Kosten umfassen die Rettungs-, Behandlungs- und Pflegekosten. Dazu kommen die Administrativkosten (Gericht, Polizei, Versicherungskosten, etc.).

Die indirekten Kosten umfassen die Produktionsverluste, die daraus entstehen, dass eine getötete Person nicht mehr im Erwerbsleben aktiv sein kann (Humankapitalansatz). Die indirekten Kosten umfassen den Mehrwert der Güter, die von einer Person produziert worden wären. Um Doppelzählungen zu vermeiden werden von den beschriebenen indirekten Bruttokosten die Konsumausgaben einer Person abgezogen. Das Ergebnis zeigt dann bei den direkten und indirekten Kosten die Nettogrößen.

**Verlust an Lebensqualität**

Es ist unbestritten, dass es neben der pekuniären Einbußen bei einem Todesfall auch einen Verlust der nicht mehr erlebbaren Jahre und somit eine verringerte Lebensqualität eines betroffenen Menschen eintritt. Diesen versucht man über Zahlungsbereitschaften abzufragen. Dabei werden Zahlungsbereitschaften für geringfügige Verringerung des Risikos zu Sterben erfragt. Diese Ergebnisse werden dann auf eine durchschnittliche Restlebenszeit hochgerechnet und zum Gesamtwert für den Verlust an Lebensqualität in einem gewissen Alter hochgerechnet.

Wenn nun Anpassungsmaßnahmen eine Verringerung von Todesfällen nach sich ziehen (Hochwasserschutz, Vermeidung von Hitzetoten), dann fallen die Nutzen oft höher aus als die Kosten. Da sie Leib und Leben schützen ist das soweit auch korrekt. Wenn man aber verschiedene Anpassungsmaßnahmen miteinander vergleicht, fallen andere Maßnahmen beim Kosten/Nutzen-Verhältnis oft etwas ab, weil bei deren Nutzen ausschließlich pekuniäre (sprich monetär effektiv zu Zahlungen führende) Größen berücksichtigt sind (z.B. vermiedene Ernteausfälle, vermiedene Wiederaufbaukosten, etc.) und keine Zahlungsbereitschaften von Betroffenen. Man könnte dann ableiten, man dürfe bei einem Vergleich von verschiedenen Anpassungsmaßnahmen also nur den Teil der ökonomischen Kosten im VSL berücksichtigen, die ebenfalls effektive Zahlungsströme nach sich ziehen. Weil es sich bei den Todesfällen durch Hitze aber z.B. meist um ältere Leute handeln dürfte, hätten diese dann keinen positiven Wert in der Kosten-Nutzen-Betrachtung, weil sie nicht mehr aktiv im Arbeitsmarkt sind.

Deshalb wurden in dieser Studie bei allen Maßnahmen, bei denen ein Wert für verlorene Lebensjahre eingesetzt werden muss, einen Range der Angaben für den Nutzen vermiedener Todesfälle angegeben. Der untere zeigt die Bewertung, wenn nur die direkten und indirekten (pekuniären) Kosten gezählt werden, der obere zeigt die Bewertung, wenn wir auch die Zahlungsbereitschaften berücksichtigen. Beide Größen widerspiegeln nicht die „Wahrheit", geben aber einen interpretierbaren Raum der Wirkungen an.

Quelle: Bickel (2005), Maibach u.a. (2008), Nash (2008), Hübler & Klepper (2007)

**Tabelle 53: Berechnung des Nutzens des Hitzewarnsystems**

| | |
|---|---|
| **Vermiedene Hitzetote** | |
| Nach VOLY-Konzept (59.000 Euro pro Jahr, Verlust von 8 Lebensjahren) | 472.000 Euro pro vermiedenen Hitzetoten |
| für 5.000 vermiedene Hitzetote in Mrd. pro Jahr | 2,36 Mrd. Euro/a |
| **Krankenhauseinweisungen** | |
| Anzahl (2071-2100) (heute: 24.500) | 150.000 |
| Kosten pro Einweisung | 3.300 Euro |
| Kosten pro Jahr | 495 Mio. Euro/a |
| Vermeidung von 30% durch Hitzewarnsystem möglich | 165 Mio. Euro/a |
| **Gesamt** | **2,5 Mrd. Euro/a** |

Auf den sekundären Nutzen der Maßnahme, etwa die Auswirkungen auf das BIP, wird hier nicht eingegangen, da Hitzewarnsysteme und zugehörige Maßnahmen hierauf vermutlich nur geringen Einfluss hätten. Zudem stellt sich das Problem, dass bspw. eine geringere Zahl an Krankenhauseinweisungen sich zunächst negativ auf das BIP niederschlagen würde, auch wenn sie aus gesellschaftlicher Sicht zweifellos eine Verbesserung darstellt.

Durch die Zahl von Akteuren, die in einem Hitzewarnsystem eingebunden sind, sind die Gesamtkosten für diese Maßnahmen schwierig zu berechnen. Beteiligte Akteure sind u.a. Wetterdienste, Landesbehörden, Pflegeeinrichtungen und Krankenhäuser, Medien etc. Für das PHWW finden sich Angaben zu den Kosten für Maßnahmen am Tag der Hitzewarnung, wie etwa für eine Telefonhotline, laufende aktuelle Information der Öffentlichkeit, etc. Ebi et al. (2004) nehmen für das PHWW maximale Kosten von US$ 3.000 pro Hitzetag an. Ebenfalls gehen Ebi et al. (2004) von US$ 4.000 pro Tag für die Verstärkung der Notdienste an Hitzetagen aus. Eine grobe Schätzung aus Basis dieser Daten führt für Deutschland zu folgendem Ergebnis: Als Berechnungsparameter dient zunächst die Einwohnerzahl. Die PHWW deckt 1,5 Mio. Personen ab. Hochgerechnet auf die deutsche Bevölkerung von ca. 80 Mio. ergeben sich Kosten von ca. 250.000 € pro Hitzetag. Bei durchschnittlich 20 Hitzetagen pro Jahr (10 Hitzetage/Jahr für heute, ca. 10 zusätzliche Hitzetage/Jahr 2071-2100) entspräche dies geschätzten Kosten von 5,0 Mio. € pro Jahr.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Effektivität der Anpassungsmaßnahme Hitzewarnsystem ist im mittleren Bereich anzusiedeln. Die Maßnahme entfaltet ihre volle Wirkung erst, wenn sie neben Informationsvermittlung auch direkte Hilfe für betroffene Kranke oder Ältere umfasst, die ihr Verhalten nicht selbständig anpassen können. Nennenswerte Mitnahmeeffekte sind bei der Maßnahme nicht zu erwarten. Vermutlich würden Verhaltensanpassungen in gewissem Umfang auch ohne Warnsystem erfolgen; allerdings bestünde das Risiko, dass diese dann sporadisch, unstrukturiert und insgesamt nicht in ausreichendem Umfang erfolgten.

Die Maßnahme hat keine dynamische Anreizwirkung. Zwar wird sie dazu beitragen, dass das Verhalten der Zielgruppe sich ändert. Diese Wirkung wird jedoch erfahrungsgemäß im Zeitablauf nachlassen. Daher muss die Informationsvermittlung in regelmäßigen Abständen wiederholt werden, um eine entsprechende Wirkung zu erzielen. Ein lang anhaltender, geschweige denn ein sich verstärkender Effekt ist dagegen nicht zu erwarten. Die Wirkung von Warnsystemen ist jeweils lokal, wobei die entsprechenden Strukturen z.T. auf regionaler bis Landesebene angesiedelt sein können.

Sowohl eine gesellschaftliche als auch politische Akzeptanz liegt vor, da die Maßnahme keine Einschränkungen oder sonstigen Nachteile für einzelne Interessengruppen mit sich bringt.

Die Maßnahme stellt eine low-regret Maßnahme dar, da bereits unter gegenwärtigen Wetterbedingungen ein Nutzen erkennbar ist. Die Wirkung steigt dabei überproportional mit der zunehmenden Häufung extremer Hitzeereignissen; dementsprechend verändert sich die Wirkung des Hitzewarnsystems auch in Abhängigkeit des verwendeten Klimaszenarios.

Die Maßnahme hat eine recht hohe Flexibilität, da sie auf das tatsächliche Eintreten von Hitzetagen angepasst werden kann. Sobald die Strukturen aufgebaut sind, ist es für die Kosten weitgehend irrelevant, an wie vielen Tagen eine Hitzewarnung erfolgt. Auch wenn es in der Anlaufphase einiger Übung und Wiederholung bedarf, um neue Kommunikationsroutinen und Verhaltensweisen zu etablieren, kann der Aufbau der nötigen Strukturen bei Bedarf vergleichsweise schnell erfolgen (innerhalb eines Jahres).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die relativ geringen jährlichen Kosten der Maßnahme einem potenziell großen Nutzen gegenüber stehen. Dieser Befund gilt, auch wenn die Schätzungen zu Kosten und Nutzen notwendigerweise mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, und insbesondere die Nutzen stark davon abhängen, wie häufig die Hitzewellen tatsächlich auftreten. Die Kosten entstehen dabei hauptsächlich in Form zusätzlicher Personalkosten. Der Nutzen besteht aus den vermiedenen Todesfällen und vermiedenen Krankenhauskosten, wobei die vermiedenen Todesfälle in der monetären Betrachtung der wichtigste Nutzenfaktor sind.

Es gibt keine Anhaltspunkte, die gegen eine politische und gesellschaftliche Akzeptanz des Instruments sprechen. Die Wirkung des Instruments tritt innerhalb kurzer Zeit ein und zeigt bereits bei gegenwärtig zu beobachtenden Extremereignissen eine Wirkung, wobei die Wirkung des Instruments direkt von der tatsächlichen Häufung extremer Hitzeereignisse abhängt. Dabei handelt es sich um eine Auswirkung des Klimawandels, die nach derzeitigem Kenntnisstand mit großer Wahrscheinlichkeit eintreten wird. Die Daten, die den Berechnungen zugrunde liegen, sind v.a. Erfahrungswerte aus der Hitzewelle von 2003. Die Kosten wurden in diesem Fall anhand vorangegangener Untersuchungen in den USA geschätzt, und sind insofern mit Unsicherheiten behaftet. Zumindest die Aggregieren der Werte von der lokalen auf die nationale Ebene erscheint aber relativ unproblematisch, da die Wirkungsweise des Instruments kaum von lokalen Gegebenheiten innerhalb Deutschlands abhängt.

## Tabelle 54: Auswertung der Maßnahme „Hitzewarnsystem“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Im Vordergrund steht der Gesundheitsschutz der Bevölkerung und damit ein absolutes Schutzgut. |
| **Effektivität** | Mittel | Das Hitzewarnsystem und darauf aufbauende Maßnahmen können Schäden an Hitzetagen vermeiden. Allerdings sind prinzipiell nicht alle Hitzeschäden durch ein solches System vermeidbar. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Die Verantwortung ein solches System muss von einer öffentlichen Stelle initiiert und auch finanziert werden. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Die Wirkdauer von Informationen ist kurz und muss regelmäßig wiederholt werden. Eine Umstellung von Prozessen sollte aber eine lange Wirkdauer aufweisen. Die Wirkung kann evtl. bei zunehmender Anzahl von Warnungen abnehmen. |
| **Reichweite** | Lokal bis national | Das Hitzewarnsystem kann je nach Ausgestaltung lokal, regional oder national vorliegen. |
| **Akzeptanz** | hoch | Da die Gesundheit der Bevölkerung im Fokus steht, ist von einer hohen politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz auszugehen. Bei den Pflegeeinrichtungen entstehen aber voraussichtlich Folgekosten. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Das System zeigt bereits heute bei Hitzetagen seine Wirkung. Die volle Wirkung wird aber erst bei deutlich mehr Hitzetagen pro Jahr und höheren Intensitäten der Ereignisse ausgeschöpft. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Bei Szenarien mit höherem Anstieg der mittleren globalen Temperatur tritt eine stärkere Wirkung der Maßnahmen auf. Da die Opferzahlen, die geschützt werden können, ansteigen. |

### 3.7.2 Anpassungsmaßnahme „Kühlung von Krankenhäusern“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Nach dem Regionalen Klimaatlas Deutschland (2011) wird die Zahl der heißen Tage 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 im Mittel um über 15 Tage pro Jahr zunehmen. Aufgrund dieses Anstiegs wird angenommen, dass eine Klimatisierung von Gebäuden im Dienstleistungsbereich (vor allem Büros), im Gesundheitsbereich und in der Gastronomie relativ schnell erfolgen wird. Krankenhäuser sind ein Kernbestandteil der Gesundheitsversorgung. Durch eine Klimatisierung von Krankenhäusern wird der Komfort der Patienten verbessert, was auch zu einem schnelleren Genesungsprozess führt. Ebenfalls erhöhen sich der Komfort und auch die Produktivität des Krankenhauspersonals. Zur Klimatisierung stehen zwei Systeme zur Verfügung: die passive und die aktive Kühlung. Die passive Kühlung von Gebäuden ermöglicht deutliche Komfortverbesserungen ohne den Einsatz von Lüftungs- oder Kühlanlagen, z.B. durch automatisierte Fensteröffnung. Unter die aktive Kühlung fallen Kühl- und Lüftungsanlagen, u.a. Umluftkühler, thermoaktive Bauteilsysteme, Kühldecken, Zuluftkühlung oder Nachtauskühlung über aktive Lüftung. Die hier vorgenommene Untersuchung von Krankenhäusern kann methodisch auch auf weitere Gebäude im Gesundheitsbereich, wie Pflegeeinrichtungen oder Altenheime, angewandt werden. Eine Überschneidung liegt darüber hinaus mit dem Handlungsfeld Bauwesen und Industrie und Gewerbe vor.

Da die Hälfte der Krankenhäuser in Deutschland im Besitz öffentlicher Träger ist und von den Kommunen finanziert wird, sind für diese Einrichtungen auch öffentliche Investitionen notwendig. Die zweite Hälfte der Krankenhäuser befindet sich in privater Hand (einschließlich kirchlicher oder gemeinnütziger Trägerschaft). Die Herausforderungen durch den Klimawandel bestehen natürlich unabhängig von der Art der Trägerschaft, allerdings unterscheiden sich die wirtschaftlichen Implikationen, insb. die Frage nach der Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen. Im Hinblick auf die negativen Wechselwirkungen einer verstärkten Klimatisierung mit dem Bereich Klimaschutz sollten bereits heute besonders energieeffiziente Anlagen mit höheren Installationskosten gefördert werden. Da der Investitionsbedarf erst mittel- bis langfristig anfällt, besteht die Möglichkeit die Klimatisierungserfordernisse in die normalen Modernisierungs- und Reinvestitionszyklen von Krankenhäusern zu integrieren.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

Jakob u.a. (2006) untersuchen die Zusatzkosten für einen Einbau verschiedener Gebäudetechniken gegenüber einem Standardneubau oder der Standard-energetischen Erneuerung im vorhandenen Gebäudebestand. Die Untersuchung betrachtet vor allem Gebäude im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, etwa Bürogebäude. Die Autoren nehmen an, dass die Daten auch für weitere Gebäude, wie Schulen und Krankenhäuser, übernommen werden können.

Die Jahreskosten der Maßnahmen zur passiven Kühlung liegen bei ca. 4 bis 8 €/$m^2_{EBF}$a. (EBF=Energiebezugsfläche bzw. Gebäudenutzfläche). Passive Kühlung ist eine

umweltfreundliche Variante der Kühlung, die aber nicht für jede Ausgangslage und jeden Gebäudestandort ausreicht, um den gewünschten thermischen Komfort zu erreichen (vgl. Jakob u.a. 2006).

Die Mehrkosten für eine aktive Kühlung sind typischerweise 2 bis 11 €/$m^2_{EBF}$a. Die aktive Kühlung sollte möglichst effizient ausgelegt werden, d.h. u.a. eine Solltemperatur über 25° C. In Kombination mit der passiven Kühlung können so Werte von unter 30 $MJ_{el}/m^2_{EBF}$a erreicht werden. Ohne begleitende Maßnahmen, wie z.B. Dämmung der Gebäudehülle und passive Kühlung, kann der Energiebedarf bis auf über 100 $MJ_{el}/m^2_{EBF}$a ansteigen (vgl. Jakob u.a. 2006).

Was den Bestand an Krankenhausbauten angeht, waren im Jahr 2009 in Deutschland 503.300 Betten für die stationäre Versorgung vorhanden. Die Betten verteilen sich auf insgesamt 2.084 Krankenhäuser (vgl. Statistisches Bundesamt 2011a). Diez & Lennerts (2010) haben eine Stichprobe von 15 Krankenhäusern untersucht. Bei den Kliniken, die nicht aktiv in Forschung und Lehre sind, lagen die Flächen zwischen 50 und 150 $m^2$ pro Bett. In die folgende Schätzung wird der Mittelwert von 100 $m^2$ pro Bett verwendet.

Auf Basis der Daten von Holeck (2008) wird weiterhin angenommen, dass 50% der Flächen eines Krankenhauses dem Pflegebereich zugeordnet werden können. Dies sind Flächen, die bisher noch nicht gekühlt werden. Um der klimawandelbedingten Temperaturerhöhung im Sommer zu begegnen, sollte hier Klimatisierungstechnik installiert werden (vgl. Aechbischer 2006). Die restliche Fläche der Krankenhäuser wird bereits gekühlt, z.B. Operationssäle oder Intensivstationen, oder müssen nicht gekühlt werden, z.B. Lager- und Kellerräume. Die zusätzlich zu kühlende Fläche in deutschen Krankenhäusern beträgt unter diesen Bedingungen ca. 25 Mio. $m^2$. Die Mehrkosten für eine passive Kühlung betragen dann 100 bis 200 Mio. €/a. Die Zusatzkosten für eine aktive Kühlung liegen bei 50 bis 275 Mio. €/a.

**Tabelle 55: Kostenberechnung der Kühlung in Krankenhäusern**

| | |
|---|---|
| **Bezugsfläche** | |
| Fläche in Krankenhäusern in Deutschland (503.300 Betten, zu jeweils 100$m^2$/Bett) | 50 Mio. $m^2$ |
| 50% der Fläche, die in Zukunft neu zu kühlen ist | 25 Mio. $m^2$ |
| **Kosten** | |
| Kosten für passive Kühlung | ca. 4 bis 8 €/$m^2_{EBF}$a |
| Kosten für aktive Kühlung | 2 bis 11 €/$m^2_{EBF}$a |
| Zusatzkosten für eine passive Kühlung | 100 bis 200 Mio. €/a |
| Zusatzkosten für eine aktive Kühlung | 50 bis 275 Mio. €/a |
| **Gesamt** | |
| **passive Kühlung** | **100 bis 200 Mio. €/a** |
| **passive + aktive Kühlung** | **150 bis 475 Mio. €/a** |

Der Nutzen einer geringeren Wärmebelastung in Krankenhäusern kann schwer quantifiziert werden. Durch die Maßnahmen wird vor allem ein höherer Komfort bei Patienten und dem Krankenhauspersonal erzielt. Es ist anzunehmen, dass auf diese Weise auch Behandlungskosten vermieden werden, die bei einer Überhitzung entstehen würden, und der

Genesungsprozess insgesamt beschleunigt wird. Hübler & Klepper (2007) berechnen Krankenhauskosten in Höhe von 495 Mio. €/a, die 2071-2100 durch hitzebedingte Erkrankungen anfallen. Es wird angenommen, dass 5% bis 15 % von diesen Krankenhauskosten und damit ca. 25 Mio. €/a bis 74 Mio. €/a für Patienten aufgewendet werden, die sich aufgrund bereits vorliegender Krankheiten in Krankenhäusern aufhalten. Diese Kosten könnten bei einer effektiven Kühlung (passiv oder aktiv) vollständig vermieden werden. Darüber hinaus wird geschätzt, dass durch eine Klimatisierung die Produktivität des Krankenhauspersonals ansteigt. In welcher Höhe die Leistungseinbußen bei Hitze eintreten, ist in der Literatur umstritten und hängt von vielen Faktoren ab, z.B. Schwere der körperlichen Arbeit und Anteil der Arbeitszeit im Freien. Hier werden die Werte parallel zur Anpassungsmaßnahme „Vermeidung von hitzebedingten Produktivitätseinbußen durch Klimatisierung mit einer reduzierten Produktivität“ verwendet. Für verschiedene Klimaszenarien ergeben sich für das Jahr 2071 Produktivitätsverluste für Personen, die in Gebäuden tätig sind, zwischen 0,38 und 0,47 %. Momentan fallen in deutschen Krankenhäusern 43 Mrd. €/a Personalkosten an (vgl. Statistisches Bundesamt 2009). Produktivitätseinbußen von 0,38-0,47 % pro Jahr hätten demnach einen Ausfall im Gegenwert von 163 - 200 Mio. €/a zur Folge. Diese Kosten könnte eine Klimatisierung weitgehend vermeiden.

**Tabelle 56: Nutzenberechnung der Kühlung von Krankenhäusern**

| | |
|---|---|
| **Vermiedene Krankenhauskosten** | |
| Vermiedene Krankenhauskosten für in Krankenhäusern befindlichen Personen | ca. 25 Mio. €/a bis 74 Mio. €/a |
| **Produktivitätseinbußen in Krankenhäusern** | |
| Produktivitätseinbußen bei Tätigkeiten in Gebäuden im Jahr 2100, pro Jahr | 0,38 - 0,47 % |
| Personalkosten in Krankenhäusern (2008) | 43 Mrd. €/a |
| Produktivitätseinbußen bei Tätigkeiten in Gebäuden im Jahr 2100, pro Jahr | 163 - 200 Mio. €/a |
| **Gesamt** | **188 – 274 Mio. €/a** |

### Beurteilung der Maßnahme

Die Anpassungsmaßnahme zur Klimatisierung von Krankenhäusern soll die menschliche Gesundheit schützen, und stellt damit auf ein besonderes Schutzgut ab. Die Schäden durch Hitze können bei passiver Kühlung reduziert, bei aktiver Kühlung nahezu vollständig ausgeschlossen werden. Bei öffentlichen Krankenhäusern bestehen keine Mitnahmeeffekte, da die Finanzierung auf öffentlichen Geldern basiert. Die Wirkung der Maßnahme bezieht sich lokal auf das jeweils ausgestattete Krankenhaus, wobei Krankenhäuser bundesweit von der Maßnahme betroffen sein können – vor allem im Süden Deutschlands, wo eine höhere Zahl von Hitzetagen erwartet wird. Die politische Akzeptanz für eine passive Kühlung ist unproblematisch. Für die aktive Kühlung besteht ein Zielkonflikt mit dem Ziel, Energieverbrauch zu senken und Emissionen zu vermeiden. Die Maßnahme ist eine low-regret Maßnahme, die bereits bei den heute zu beobachtenden Hitzewellen den Komfort erhöhen kann. Eine vollständige Wirkung der Anlagen ist bei der aktiven Kühlung gewährleistet. Bei der aktiven Kühlung kann an wenigen heißen Tagen eine eingeschränkte

Wirkung zu verzeichnen sein; an sehr heißen Tagen ist zu überprüfen, ob die Wirkung der Anlagen noch einen ausreichenden Kühleffekt liefern kann. Durch die Lebensdauer von 15-20 Jahren ist es jedoch möglich, die Anlagen periodisch an höhere Temperaturen anzupassen, wenn ohnehin ein Ersatz der Anlage ansteht. Die Maßnahme hat eine hohe Szenario-Flexibilität, zumal die Wirkung bei allen Klimaszenarien benötigt wird (auch wenn sich die Kosten und Nutzen für die verschiedenen Szenarien unterschiedlich darstellen).

Die Kosten-Nutzen Betrachtung war für die Maßnahme deutschlandweit möglich. Die Diskussion des Energieanstiegs aufgrund der Klimatisierung von Gebäuden fokussieren aber bisher stark auf Bürogebäude, die nur teilweise auf Gebäude im Gesundheitsbereich übertragbar ist. Zum Beispiel ist im Gesundheitsbereich eine 24-h Klimatisierung notwendig, wobei Bürogebäude nur tagsüber genutzt werden. Die Ergebnisse könnten konkretisiert werden, wenn noch genauere Daten zur Flächenaufteilung und dem notwendigen Klimatisierungsbedarf in Krankenhäusern vorlägen.

Für diese Maßnahme treten Kosten für eine passive Kühlung von 100 bis 200 Mio. €/a und für aktive Kühlung in Höhe von 50 bis 275 Mio. €/a auf. Diesen Kosten steht ein Nutzen von 25 bis 75 Mio. €/a eingesparten Behandlungskosten und 163 - 200 Mio. €/a für vermiedene Leistungseinbußen beim Krankenhauspersonal gegenüber. Nicht quantifiziert wurde der Nutzen in Form eines verringerten Mortalitätsrisikos. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist somit recht ausgewogen. Die maximalen Kosten übersteigen in der Summe aus passiver und aktiver Kühlung den maximalen Nutzen.

## Tabelle 57: Auswertung der Maßnahme „Kühlung von Krankenhäusern“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Im Vordergrund steht der Schutz der Gesundheit der Bevölkerung und damit ein absolutes Schutzgut. |
| **Effektivität** | 50-100% | Durch die Kühlung von Krankenhäusern können die Hitzeschäden je nach Art der Klimatisierung bis zu fast 100% reduziert werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | keine | Öffentliche Krankenhäuser finanzieren sich durch öffentliche Gelder, so dass kein Mitnahmeeffekt vorliegt. |
| **Dynamische Anreizwirkung** | Nein | Es liegt keine dynamische Anreizwirkung vor. Die Maßnahme wirkt analog zur Lebensdauer der Anlagen. |
| **Reichweite** | Lokal | Die Kühlung tritt nur ganz lokal in den entsprechend ausgestatteten Krankenhäusern/Räumen des Krankenhauses auf. |
| **Akzeptanz** | Mittel-hoch | Da die Gesundheit der Bevölkerung im Fokus steht, ist von einer hohen politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz auszugehen. Für die passive Kühlung ist diese höher als für aktive Kühlung. Bedenken bestehen bei einem höherem Energieverbrauch und Verhaltensumstellungen bei Bewohnern der Räume und des Krankenhauspersonals. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Die Kühlung erhöht bereits heute den Komfort und wirkt sich positiv auf die Genesung aus. Die volle Wirkung wird aber erst bei deutlich mehr Hitzetagen pro Jahr und höheren Intensitäten der Ereignisse ausgeschöpft. |
| **Szenario-Variabilität** | reduzierte Wirkung | Bei Szenarien mit höherem Anstieg der mittleren globalen Temperatur tritt eine stärkere Wirkung der Maßnahmen auf, da die Hitzebelastung ansteigt. Bei sehr starken Hitzeperioden kann die Kühlung auch nicht ausreichend sein. |

## 3.8 Handlungsfeld Boden

### 3.8.1 Anpassungsmaßnahme „Bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Die im vorliegenden Bericht betrachteten wichtigsten Auswirkungen des Klimawandels im Handlungsfeld Boden sind die Bodenerosion infolge von Trockenheit oder Starkniederschlägen sowie der in einigen Regionen zu erwartende Verlust der Retentionsfunktion infolge von Trockenheit. Laut Prognosen könnte die Regenmenge in den Sommermonaten in Deutschland bis 2071-2100 ggü. 1961-1990 im Mittel um 21 % abnehmen. (vgl. Regionaler Klimaatlas Deutschland 2011). Starkregenereignisse sollen vor allem in den Wintermonaten stark in Häufigkeit und Intensität zunehmen. Um den daraus folgenden Problemen der Bodenerosion in der Landwirtschaft entgegen zu wirken, bieten sich bodenschonende, konservierende Bewirtschaftungsmethoden an. Die konservierende Bodenbearbeitung ist der Oberbegriff für Bodenbearbeitungsverfahren, die ohne eine wendende Bearbeitung des Bodens mittels Pflug auskommen. Beispiele sind das Direktsaatverfahren und das Mulchsaatverfahren ohne Pflug. In Nordamerika ist diese Art der Bodenbearbeitung weit verbreitet. In Deutschland wurde inzwischen ein Anteil von circa 50 % erreicht, wobei die Landwirte zum Teil je nach Fruchtart und Fruchtfolge zwischen verschiedenen Bewirtschaftungsarten wechseln (Hoffmann 2009 zitiert nach Wurbs & Steininger 2011). Epperlein (2008) zeigt, dass die Bodenbearbeitungsarten in den Bundesländern unterschiedlich stark angewandt werden. Für pfluglos bewirtschaftetes Wintergetreide schwanken die Flächenanteile zwischen 29% in Schleswig-Holstein und 75% in Thüringen. In den letzten Jahren ist der Anteil gestiegen, dies liegt an der Einführung von Erosionsschutzprogrammen und der zugehörigen finanziellen Förderung durch verschiedene Bundesländer. Aber auch für den einzelnen Betrieb treten Vorteile auf, z.B. können Arbeitsspitzen vermieden werden und die Verdunstung kann vermindert werde, was vor allem für niederschlagsarme Gebiete relevant ist (vgl. Brand-Sassen 2004).

Die Umstellung auf eine bodenschonende Bewirtschaftung von Ackerflächen ist die zentrale Anpassungsmaßnahme im Bereich Boden. Positive Effekte zeigen sich auch für die Landwirtschaft und den Hochwasserschutz, wo konservierende Bodenbearbeitung die Infiltrationsrate des Bodens verändert und zu einem vorsorgenden Hochwasserschutz beitragen kann. Auch für den Gewässerschutz wirkt sich die erosionsmindernde bodenschonende Bodenbewirtschaftung positiv aus, weil der Eintrag vor allem von Stickstoff, aber auch Phosphor vermindert und damit die Eutrophierung verhindert wird. Die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (2007) stellte zudem anhand eines Begleitprojekts positive Auswirkungen auf die biologische Vielfalt fest. Schließlich entsteht Nutzen, indem die sogenannten „off-site damages“ der Erosion vermieden werden: so kann die Erosion dazu führen, dass Gräben und Bachläufe versanden und ggf. wasserbauliche Infrastruktur (Dämme, Kanäle) beschädigt wird. Weggespültes Erdreich nach Starkregen kann zudem Verkehrswege beeinträchtigen. Quantifizierte Angaben hierzu liegen leider nicht vor.

Die Verantwortung für die Durchführung für die Maßnahme liegt vor allem bei den Landwirten selbst, die mit der Maßnahme die Ertragsfähigkeit ihrer Böden erhalten können. Langfristig ist im Durchschnitt nicht mit abnehmenden Deckungsbeiträgen für die Betriebe zu rechnen (vgl. MLUR Brandenburg 2003). Während der Umstellungsphase entsteht aber ein hoher Investitionsbedarf für landwirtschaftliche Geräte, z.B. Direktsaatmaschinen, und es können in der Umstellungsphase Ernterückgängen auftreten, da die Bewirtschaftungsmethode höheres pflanzenbaulich-technisches Wissen voraussetzt (vgl. Brand-Sassen 2004). Eine Anschubfinanzierung bzw. Informationsangebote für die konservierende Bodenbearbeitung können die Verbreitung in den nächsten Jahren erhöhen. Wie eingangs erwähnt, gibt es in mehreren Bundesländern Erosionsschutzprogramme, die auch eine finanzielle Förderung vorsehen. Als Regulierungsinstrument könnte in stark von Trockenheit betroffenen Gebieten eine Pflicht zur konservierenden Bewirtschaftung eingeführt werden. Die Maßnahme kann zwar kurzfristig umgesetzt werden. Bis sich eine messbare Wirkung – in Form einer geringeren Bodenerosion - einstellt, ist aber eine gewisse Zeitspanne notwendig. Die Maßnahme benötigt damit einen gewissen Vorlauf.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Das Bundesland Sachsen unterstützt bereits seit 1993 die Umstellung auf bodenkonservierende Bodenbearbeitung über das Förderprogramm zur umweltgerechten Landwirtschaft. Zwischen 2000-2005 stieg die konservierend und in Mulchsaat bestellte Ackerfläche von 140.000 ha auf rund 246.000 ha an, ein Zuwachs von mehr als 100.000 ha Ackerfläche (vgl. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft 2007). Für das gesamte Förderprogramm wurden pro Jahr jeweils 65 Mio. Euro zur Verfügung gestellt (vgl. Vopel o.J.). Das Programm weist fünf Förderschwerpunkte auf. Im Förderschwerpunkt „Umweltgerechter Ackerbau“ besteht eine Zusatzförderung für bodenschonende Maßnahmen, welche 40% der geförderten Fläche des Förderschwerpunkts umfasst. Unter der Annahme, dass das Fördergeld gleichmäßig über die fünf Förderschwerpunkte verteilt wurde und 40% der geförderten Fläche diesem Förderschwerpunkt bodenschonenden Maßnahmen zugeschlagen werden, ergibt sich eine Förderhöhe von 5,2 Mio. Euro pro Jahr. Aufgrund der oben dargestellten Zahlen ergibt sich, dass pro Jahr 20.000 ha gefördert wurden, was einer Förderung von 260 Euro/ha entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass mit dieser Förderung auch etwaige Investitionskosten für neue Maschinen oder Kosten für den Einsatz von Düngemitteln abgedeckt sind, die landwirtschaftlichen Betrieben entstehen.

Für den Nutzen der Maßnahme wird nach De Groot (2006) der Ertragsrückgang durch steigende Trockenheit bei verschiedenen IPCC-Szenarien zwischen 22% und 37% herangezogen. Die bodenschonende Bodenbearbeitung kann das Speichervermögen des Bodens erhöhen und es wird angenommen, dass so 10% der Ernterückgänge kompensiert werden können. Die Bruttowertschöpfung im Bereich der Land- und Forstwirtschaft und Fischerei lag im Jahr 2010 bei 19,48 Mrd. Euro (Statistisches Bundesamt 2011b). Es wird angenommen dass zwei Drittel davon von der Landwirtschaft erwirtschaftet werden, also rund 13 Mrd. Euro. Bei 16,8 Mio. ha Gesamtanbaufläche in Deutschland (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) beträgt das BIP pro ha ca. 800 Euro. Wenn durch die bodenschonende Bodenbearbeitung ein Ernterückgang von 10% abgewendet werden könnte, entspräche dies rund 80 Euro pro ha.

Die geschätzten Kosten der Maßnahme von 260 Euro liegen damit zunächst etwa drei Mal so hoch wie der Nutzen. Allerdings sollte die Förderung für die Umstellung zeitlich begrenzt

gewährt werden, wogegen die Wirkung länger anhält. Wie bereits oben erwähnt, ist zudem zusätzlicher Nutzen für die Hochwasservorsorge, den Wasserhaushalt und die biologische Vielfalt zu erwarten, die hier nicht monetär bewertet wurden, jedoch ebenfalls in die Abwägung von Kosten und Nutzen einzubeziehen sind. Zudem werden Kosten für die sogenannten „off-site damages“ der Erosion und deren Beseitigung vermieden.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Maßnahme hilft dabei, die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und damit die Erträge in der Landwirtschaft zu sichern. Die konservierende Bodenbearbeitung kann der Bodenerosion aufgrund steigender Trockenheit und Stürmen begegnen. Darüber hinaus sind jedoch weitere Maßnahmen notwendig. Wird die Maßnahme mit öffentlichen Geldern unterstützt, besteht die Gefahr von Mitnahmeeffekten, da die Bodenbesitzer ein eigenes Interesse daran haben die Ertragsfähigkeit ihrer Böden zu bewahren. Eine Unterstützung kann jedoch angezeigt sein, um gerade kleinere Landwirtschaftsbetriebe bei den erforderlichen Investitionen zu unterstützen; diese Unterstützung sollte in jedem Fall zeitlich befristet werden auf die Umstellungsphase. Der Effekt der Maßnahme hält so lange an, wie die konservierende Bodenbearbeitung zur Anwendung kommt; durch eine dauerhafte Umstellung der Bearbeitungsmethode kann also ein langfristiger Effekt erreicht werden. Die Wirkung ist jeweils lokal für die bewirtschaftete Fläche. Neben der Landwirtschaft profitieren weiterhin die Sektoren, die andernfalls von den off-site-Schäden durch erodiertes Erdreich betroffen wären, d.h. insbesondere Verkehr und Wasserwirtschaft, und dabei die Körperschaften die für die Unterhaltung von Straßen, Dämmen, Gräben und Bächen zuständig sind. Der Umstieg auf bodenkonservierende Bodenbearbeitung weist neben der Anpassung an den Klimawandel zusätzliche Vorteile auf und ist deshalb eine no-regret-Maßnahme. Zudem kann die Maßnahme vergleichsweise einfach rückgängig gemacht werden, indem die Bodenbearbeitung wieder zu herkömmliche Verfahren zurückkehrt – allerdings um den Preis, den Maschinenpark wieder auf diese Verfahren umzustellen. Anhand der Kosten und Nutzen, die hier quantifiziert wurden, übersteigen die Kosten den Nutzen der Maßnahme. Dabei wurden jedoch verschiedene positive Wirkungen, z.B. auf Hochwasserschutz, Wasserhaushaushalt und biologische Vielfalt, nicht quantifiziert. Ob sich der Kosten-Nutzen-Vergleich zu einem anderen Ergebnis führt, wenn diese einbezogen würden, lässt sich allerdings mit den vorhandenen Informationen nicht feststellen.

## Tabelle 58: Auswertung der Maßnahme „Bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Die konservierende Bodenbearbeitung stellt eine Hauptmaßnahme zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Verringerung der Bodenerosion dar. Es liegen positive Effekte auf andere Handlungsfelder vor, z.B. Wasserhaushalt. |
| **Effektivität** | Mittel | Die Maßnahme kann einen Teil des Schadens abwenden und ist eine zentrale Maßnahme zur Vermeidung der Bodenerosion. Aber weitere Maßnahmen sind notwendig. |
| **Mitnahmeeffekte** | Mittel | Mitnahmeeffekte können entstehen, da Bodenbesitzer ein Interesse daran haben die Qualität ihrer Böden zu erhalten. Diese Gefahr ist bei der Ausgestaltung der Förderung zu berücksichtigen. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, gering | Die Förderung wirkt während der Umstellungsphase, danach besteht kein Anreiz die Situation weiter zu verbessern. |
| **Reichweite** | Lokal | Die Wirkung zeigt sich für die umgestellte Ackerfläche. |
| **Akzeptanz** | Mittel | Durch verschiedene Förderprogramme ist dieses Thema in der politischen Diskussion bereits verankert. Bei einem Teil der Landwirte liegen noch Unsicherheiten bezüglich der auftretenden Ernteausfälle beim Umstellungsprozess vor. |
| **Regret/No-regret** | No-regret | Bereits heute bestehen Probleme im Bereich der Landwirtschaft aufgrund der Bodenerosion. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Aufgrund der bereits heute vorliegenden Problemlage ist die Maßnahme szenario-variabel. |

## 3.9 Handlungsfeld Biologische Vielfalt

### 3.9.1 Anpassungsmaßnahme „Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Aufgrund des Klimawandels, den damit verbundenen Extremereignissen und weiteren globalen Veränderungen besteht die Gefahr, dass die Grenze der Belastbarkeit einiger natürlicher Ökosysteme im 21. Jahrhundert erreicht wird (vgl. IPCC 2007). Relevante Klimaänderungen, die die biologische Vielfalt beeinflussen, sind Temperaturveränderungen, Veränderungen im Niederschlagsregime, z.B. zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, die Zunahme der Häufigkeit und Stärke von Extremwetterereignissen, z.B. Stürme und Trockenphasen, Zunahme von Waldbränden, und die Ausbreitung invasiver Arten. Als Folge dessen wird erwartet, dass die sich die Lebensräume von Pflanzen und Tieren in Richtung Norden bzw. in höhere Lagen verschieben, sofern dies möglich ist. Auch wird davon ausgegangen, dass die Population von Pflanzen und Tieren, die sich an die Klimaveränderung nicht anpassen können und keine Möglichkeit haben in andere Regionen auszuweichen, abnehmen wird (vgl. BfN 2008).

Einigen Studien modellieren den Umfang des Artensterbens für die nächsten Jahrzehnte, z.B. berechnen Thomas et al. (2004), dass 3-13% der Pflanzenarten in Europa bis 2050 aussterben könnten. Braat & ten Brink (2008) gehen von einem Biodiversitätsverlust weltweit von 11% bis 2050 aus. Im Projekt ATEAM wurden Prognosen für den Artenverlust in Deutschland erstellt, wobei im „worst case Szenario“ bis 2080 in Nordwestdeutschland 25% und in Süd- und Ostdeutschland über 50% der Arten verloren gehen könnten (vgl. Schröter et al 2004). Eine zweite Bedrohung können invasive, d.h. gebietsfremde Arten darstellen. Ausmaß und Effekte auf die bestehenden Ökosysteme sind jedoch nicht eindeutig geklärt.

Der Aufbau und das Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung ist die einzige betrachtete Anpassungsmaßnahme, die originär auf den Erhalt der Artenvielfalt abzielt. Durch die Maßnahme werden größere Lebensräume geschaffen, Wanderungswege für Arten eröffnet und getrennte Populationen miteinander verbunden, um so deren Resilienz gegenüber externen Belastungen zu verbessern. Im weiteren Zusammenhang gehören hierzu auch Landnutzungskonzepten und raumplanerische Maßnahmen, etwa indem bestehende Schutzgebiete durch Korridore miteinander verbunden werden.

Die Maßnahme liegt in der Verantwortung der öffentlichen Hand. Die Verwaltungen von Naturschutzgebieten sind hierbei ein wichtiger Akteur. Die Finanzierung der Naturparkverwaltungen erfolgt zum Großteil über Landesmittel. Teile der Finanzierung werden auch von Stiftungen, Fördervereinen und Partnern aus der Wirtschaft erbracht.

Ein Verlust an Biodiversität ist schon heute festzustellen; der Klimawandel wird diesen Trend voraussichtlich nochmals verstärken. Die Umsetzungsphase bis zur Ausweisung eines Schutzgebietes kann leicht mehrere Jahre dauern, da die Ausweisung verwaltungstechnisch umgesetzt werden muss und die Ausweisung unter Umständen bestehende Nutzungen einschränkt und daher mit Widerständen vor Ort zu rechnen ist.

## Kosten- und Nutzenerfassung

IEEP et al. (2010) haben untersucht, welche Geldbeträge zum Ausbau des Natura 2000-Netzwerks notwendig sind. Das Ziel des Netzwerkes ist es die geschützten Flächen in der EU auf durchschnittlich 18 % der Landesfläche zu erhöhen. Sie haben für EU-25 einen Bedarf von 5.700 Mrd. Euro pro Jahr für den Ankauf von Flächen und das Management von Flächen berechnet –für den Ankauf entstehen ein Drittel der Kosten (1.900 Mrd. Euro pro Jahr), für die Pflege und das Management zwei Drittel (3.800 Mrd. Euro pro Jahr). Die EU fördert zur Zeit den Aufbau und das Management des Netzwerks in der Höhe von ca. einem Viertel der auftretenden Kosten von 5.700 Mrd. Euro. Es besteht also noch ein deutlicher Investitionsbedarf. Wenn angenommen wird, dass ein Anteil von 25 % der Investitionen nötig wäre, um eine Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen. In die weitere Berechnung soll nur der Anteil für Pflege und Management eingehen, da ein Ankauf von Flächen nur innerhalb einer befristeten Zeitperiode auftritt.

Es soll davon ausgegangen werden, dass das oben genannte Ziel zwischen den Ländern Europas im Verhältnis zu deren Flächen aufgeteilt wird. (Europa = 10.180.000 km², Deutschland = 357.020 km²). Es ergeben sich 135 Mrd. Euro pro Jahr für den Erhalt der Schutzgebiete in Deutschland.

Zur Berechnung von Schadenskosten und damit des Nutzens ziehen Berry et al. (2006) die Wiederherstellungskosten heran. Dieser Ansatz wird hier übernommen, wobei zu erwähnen ist, dass auch irreversible Schäden und Habitatverluste auftreten. Die Kosten beziehen sich auf einzelne Habitate und betragen für 11 Habitate in Großbritannien für das Jahr 2050 im Hochpreis-Szenario insgesamt 2,9 Mrd. Euro pro Jahr (£ 2,5 Mrd.); im Niedrigpreis-Szenario sinken diese auf 1,6 Mrd. Euro pro Jahr (£ 1,4 Mrd.) Die Kostengrößen, die als Grundlage der Berechnung genutzt werden, stammen aus dem UK Biodiversity Action Plan[46]. Da bisher keine vergleichbaren Daten für Deutschland vorliegen, wird auf Basis der Fläche von Großbritannien (243.820 km²) und Deutschland (357.020 km²) der Wert auf Deutschland umgerechnet. Die Werte aus dieser Berechnung stellen somit eine grobe Schätzung dar. Demnach ergeben sich Kosten von 2,3 - 4,2 Mrd. Euro pro Jahr.

## Beurteilung der Maßnahme

Der Schutz der Biodiversität gehört, neben dem Klimawandel, zu den wichtigsten Herausforderungen der Umweltpolitik. Der Ausbau und die Vernetzung von Schutzgebieten ist eine effektive Möglichkeit, um die Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme zu stärken, und insbesondere eine Anpassung an ein sich änderndes Klima zu unterstützen. Da es sich bei der Artenvielfalt um ein öffentliches Gut handelt, und der Naturschutz damit ohnehin auf öffentliche Gelder angewiesen ist, sind keine wesentlichen Mitnahmeeffekte zu erwarten. Bei Einrichtung der Schutzgebiete wirkt die Maßnahme langanhaltend, sofern die Vorgaben zum Schutz der Natur eingehalten werden, wovon jedoch in Deutschland ausgegangen werden kann. Je nach Ausmaß und Erfolg der Verknüpfung von Schutzgebieten kann die Maßnahme regional oder national wirken. Bei der

[46] Es ist anzumerken, dass im UK Biodiversity Action Plan 28 Habitate beschrieben werden, so dass die genannten Zahlen keine vollständige Kostenaufstellung für Großbritannien darstellen.

Ausweisung neuer Schutzgebiete kann es durchaus zu Akzeptanzproblemen kommen, da die Ausweisung in der Regel bisherige Landnutzungen einschränkt, insbesondere in der Landwirtschaft. Neben dem Schutz der Artenvielfalt erzeugt die Maßnahme weiteren Nutzen, so eröffnet der Ausbau von Schutzgebieten bspw. zusätzliche Naherholungsmöglichkeiten. Auch wenn der Ausbau von Schutzgebieten die bisherige Landnutzung einschränkt und daher nicht kostenfrei möglich ist, stellt er insofern eine No-regret-Maßnahme dar, als die Bundesregierung ohnehin vor der Herausforderung steht, ihre Anstrengungen für den Artenschutz zu intensivieren. Die Maßnahmen entfaltet in allen Klimaszenarien eine Wirkung. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist hier negativ. Ein großer Teil des Nutzens ist hier aber noch nicht inbegriffen, da der wirtschaftliche Wert der Biodiversität grundsätzlich schwer zu bewerten ist, und bestehende Methoden für die vorliegende, spezifische Frage nicht anwendbar sind.

**Tabelle 59: Auswertung der Maßnahme „Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung“**

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Der Erhalt der Biodiversität zählt zu den vorrangigen Zielen der Umweltpolitik. |
| **Effektivität** | Hoch | Die Maßnahme ist effektiv, um die Resilienz und Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen zu unterstützen. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Mitnahmeeffekte liegen keine vor, da in diesem Bereich eine öffentliche Finanzierung ohnehin notwendig ist. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die Wirkung tritt langanhaltend auf. Allerdings besteht nach Erreichen des Ziels kein Anreiz für weiteren Ausbau der Maßnahme |
| **Reichweite** | Regional/national | Die Wirkung zeigt sich je nach Größe der Schutzgebiete regional bis national. |
| **Akzeptanz** | Mittel/hoch | Sowohl bei politischen Akteuren als auch bei der Bevölkerung liegt schon eine hohe Sensibilisierung vor. Auf lokaler Ebene kann es jedoch zu Nutzungskonflikten und daher zu Akzeptanzproblemen kommen. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Verstärkte Maßnahmen zum Artenschutz ohnehin erforderlich. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Aufgrund der bereits heute vorliegenden Problemlage ist die Maßnahme szenario-variabel. Bei stärkeren Klimaänderungen wird die Wirkung noch erhöht. |

### 3.9.2 Vertiefung: Anpassungsmaßnahme „Renaturierung von Auenlandschaften“

#### Beschreibung der Maßnahme

Der Auenwald ist eines der artenreichsten Ökosysteme in Mitteleuropa. Die Pflanzen und Tiere in Auenlandschaften sind sehr gut an Überflutungen angepasst (Dister 1985). Diese überflutungstolerante Biozönose entwickelt sich aber nur, wenn sie regelmäßig überflutet wird. Im Gegensatz dazu sind Ökosysteme und Landschaften, die nur in Extremsituationen überflutet werden, bei solchen Ereignissen stark gefährdet. Vorhandene Pflanzen und Tiere sind auf Überflutungen nicht angepasst. Da durch den Klimawandel intensivere und häufigere Starkregenereignisse zu erwarten sind (Regionale Klimaatlas 2011), ist es von besonderer Bedeutung das flussnahe Ökosysteme intakt sind. Um auch auf weitere Klimaveränderungen, wie erhöhte Temperatur zu reagieren, sind besonders Verbünde von Ökosystemen (u.a. in der Form von Schutzgebieten) erstrebenswert, da diese vielen Tier- und Pflanzenarten bei veränderten klimatischen Verhältnissen Ausweichmöglichkeiten bieten können.

Die Renaturierung von Auenflächen dient sowohl dem Schutz der biologischen Vielfalt als auch einem naturverträglichen Hochwasserschutz. Auenwälder bieten gegenüber anderen Hochwasserschutzmaßnahmen, wie Poldern oder Deichbauten, wertvolle Lebensräume und helfen so, Artenvielfalt zu erhalten. Gleichzeitig sind z.B. Polder als Hochwasserschutzmaßnahmen u.U. effektiver, indem sie die gezielte Kappung des Hochwasserscheitels ermöglichen (Zielaskowski & Lüderitz 2004, Bronstert 2004).

Das Thema naturverträglicher Hochwasserschutz rückte, wie auch der Hochwasserschutz insgesamt nach den Hochwasserereignissen an Elbe (2002) und Oder (1997) ins öffentliche Interesse. Zuvor waren allerdings Auenflächen immer weiter reduziert worden: an der Oder etwa wurden in den letzten hundert Jahren Retentionsflächen um 80 % auf etwa 75.000 ha verringert. Für die Elbe ist die Situation ähnlich: 80% der Überschwemmungsflächen sind durch Ausdeichungen verloren gegangen. Nach den letzten Hochwässern wurden zwar zahlreiche Maßnahmen diskutiert und geplant, aber bisher nur wenige davon wirklich umgesetzt. So sollten zum Beispiel nach dem Hochwasser 1997 6.000 ha an zusätzlichen Überflutungsflächen in Brandenburg eingerichtet werden; im Jahr 2007 waren es jedoch erst 180 ha (Scholz et al 2005, Schunicht et al 2009).

Für die ökonomische Bewertung von Renaturierungsvorhaben oder eingerichteten/ geplanten Retentionsflächen an Flüssen liegen bereits mehrere Studien für Deutschland vor, die diese Projekte u.a auch ökologisch bewerten. Allerdings stellt keine dieser Studien die Renaturierung von Flussauen in den Zusammenhang von Klimaänderungen oder der Anpassung an den Klimawandel.

Grossmann et al. (2010) untersuchen z.B. die naturverträgliche Hochwasservorsorge an der Elbe. Sie stellen dabei Berechnungen für Deichrückverlegungen an, die im Wesentlichen auf Standorten aus dem IKSE Aktionsprogramm Hochwasser von 2003 (IKSE 2003) basieren. Grossmann et al. (2010) vergleichen mehrere Szenarien von Deichrückverlegungen sowie von gesteuerten und ungesteuerten Flutpoldern. Gesteuerte Polder dienen dazu, den Hochwasserscheitel zu kappen, d.h. sie werden zu Beginn des Hochwasser freigehalten und

erst kurz vor dem Hochwasserscheitel geöffnet. Ungesteuerte Polder sind Retentionsflächen, die dauerhaft mit dem Gewässer verbunden sind.

Eine weitere Studie von Bronstert (2004) betrachtet die Kosten und Nutzen von zwei gesteuerten/ungesteuerten Flutpoldern an Havel (Untere Havelniederung) und Oder (Neuzeller Niederung). Beide Polder dienen vor allem dem Hochwasserschutz, zumal sie weder an Natura2000-Gebiete noch an andere Schutzgebiete angeschlossen sind. Die Kosten-Nutzen-Berechnung basiert auf den Kosten der geplanten Deichrückverlegung, die den Nutzen der vermiedenen Kosten eines einmaligen Hochwasserereignisses gegenübergestellt werden. Meyerhoff & Dehnhardt (2002) liefern eine weitere Studie zur Elbe, die auch die Bewertung von ökologischen Komponenten umfasst. Die Autoren befragten 1.300 Personen zu ihrer Zahlungsbereitschaft für Auenrevitalisierung und ermittelten damit einen monetären Wert für den Schutz der biologischen Vielfalt im Zusammenhang mit der Renaturierung von Auen.

**Beschreibung des Fallbeispiels**

Jedes Renaturierungs- und Deichrückverlegungsprojekt hat seine eigenen Rahmenbedingungen, was die Gefährdungslage von Hochwasserschäden angeht, die derzeitige Flächennutzung und die (Opportunitäts-)kosten einer Umnutzung von Flächen, etc. Die Bewertung im Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel wird im Folgenden anhand einer Fallstudie betrachtet. Als Fallstudie wird ein relativ gut verallgemeinerbares Beispiel verwendet, das keine besondere Gefährdungslage darstellt und in ähnlicher Form auch an anderen Gewässern anzutreffen ist.[47] Wo möglich, werden die Ergebnisse des Fallbeispiels verallgemeinert.

An der Elbe finden sich verschiedene Projekte zur Rückverlegung von Deichen. Die größten sind die Projekte „Lenzener Elbauen“ und „Lödderitzer Forst“ mit 420 und 590 ha. Das Projekt in Lenzen ist seit 2010 abgeschlossen, die Retentionsflächen im „Lödderitzer Forst“ sollen 2013 umgesetzt sein. Die Deichrückverlegung an diesen Stellen haben durch ihre Wirkung auf das Ökosystem eine besondere Bedeutung für den Naturschutz, da ein Verbund mit den beiden letzten größeren Hartholzauenwäldern Elbholz (120 ha) und Garbe in Sachsen-Anhalt (180 ha) entsteht. Die beiden Gebiete mit Auenwaldbeständen sind vernetzt über die flussbegleitenden Weichholzauenreste (Trägerverbund Burg Lenzen e.V. 2011; WWF 2008).

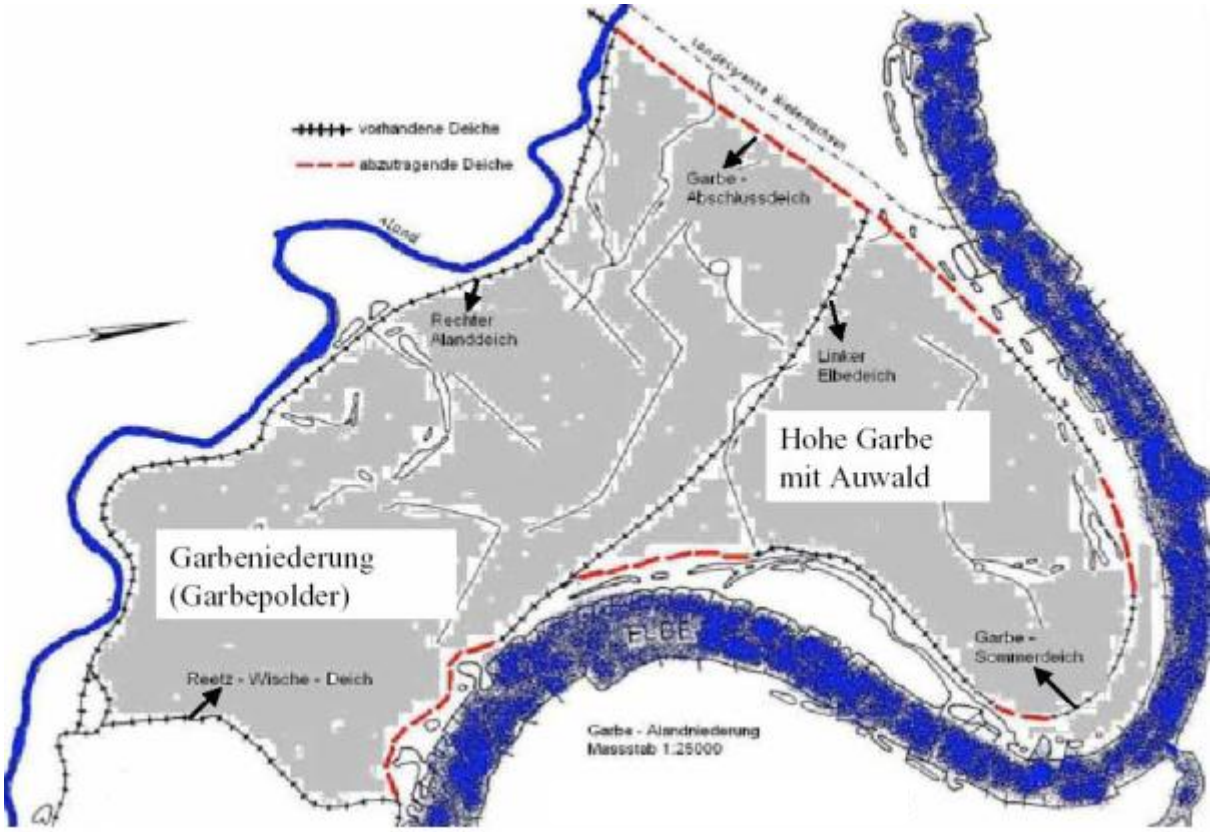
Für die vorliegende Studie dient ein Gebiet am Nordrand dieses Biotopverbundes an der Garbe-Niederung als Fallbeispiel. Bei der Anpassungsmaßnahme steht die Erhaltung der biologischen Vielfalt im Vordergrund; das Untersuchungsgebiet ist bereits als Naturschutzgebiet ausgewiesen und ist Teil des Biosphärenreservats „Mittlere Elbe“. Die derzeitige Situation ist zweigeteilt (siehe Karte auf der folgenden Seite): Das Gebiet „Hohe Garbe“ direkt an der Elbe fungiert bereits als Überflutungsfläche und ist bisher durch einen Sommerdeich geschützt, der bei einem Pegelstand von 5,80 m überflutet wird. Diese Fläche ist bereits teilweise mit einem Auwaldbestand bepflanzt. Die zweite Teilfläche, die

[47] Ein ähnliches Projekt zur Anpassung an den Klimawandel an Küstenschutz wird momentan an der britischen Küste umgesetzt (Wallasea Island) (siehe http://ec.europa.eu/environment/nature/climatechange/pdf/EbA_EBM_CC_FinalReport.pdf).

Garbeniederung, liegt hinter dem Elbedeich und wird momentan als Polder für den Fluss Aland genutzt. Durch den Umbau der Hochwasserschutzanlagen an der Aland wird das Hochwasser der Aland aber zukünftig in den Fluss Seege abgeleitet, so dass die Garbeniederung nicht mehr als Flutpolder benötigt wird. Eine Flutung wäre hier nur bei extremen gleichzeitigen Hochwässern der Aland und Elbe nötig, so dass die Flächen zum Großteil als landwirtschaftliche Ackerflächen genutzt werden konnten. (Zielaskowski & Lüderitz 2004, BWK 2006, LVwA Sachsen-Anhalt 2011).

Das Projekt zielt als erstes auf die Entwicklung einer dynamischen Flusslandschaft mit einer hohen ökologischen Vielfalt ab, dient aber auch einem ästhetischen Landschaftsbild und damit einem höheren Erholungswert. Aus dem bisherigen Acker- und Grünland soll sich eine abwechslungsreiche und artenreiche Auenlandschaft entwickeln.

**Abbildung 12: Garbeniederung mit vorgeschlagenen Deichschlitzungen**




*Quelle: Zielaskowski (2004)*

Der flussnahe Sommerdeich müsste an mehreren Stellen geschlitzt werden. Zielaskowksi (2004) schlägt eine Schlitzung an vier Stellen vor, so dass eine ungehinderte Durchflutung stattfinden kann. Die Überflutung geschieht ungesteuert, da eine regelmäßige Durchflutung den höchsten ökologischen Nutzen verspricht. Zusätzlich sollte der vorhandene Elbedeich über eine längere Strecke auf die reguläre Geländehöhe abgetragen werden. Die Deiche an der Westseite und Südseite der Garbeniederung müssten dann als Elbewinterdeiche ausgebaut werden. Die neuen Elbedeiche hätten dann eine Länge von ca. 8 km. Dagegen würden vorhandene Deiche auf einer Länge von 7,5 km abgetragen und zurückgebaut.

Diese Maßnahmen ergeben eine zusätzliche Überflutungsfläche von 611 ha in der Garbeniederung mit einem zusätzlichen Retentionsvermögen von 13 Mio. $m^3$. (vgl. Zielaskowski & Lüderitz 2004, Jüpner et al. 2011).

## Kosten- und Nutzenerfassung

Die Kosten- und Nutzenbewertung des Fallbeispiels erfolgt anhand folgender Kosten- und Nutzenaspekte:

Kosten:

- Kosten für Deichbau und –rückbau, Deichschlitzung und geringere Unterhaltungskosten des Deichs
- Kosten für den Ankauf von Flächen
- Ertragsverlust der landwirtschaftlichen Flächen
- Anpflanzungskosten für Auenwaldbestand

Nutzen:

- Nutzen für den Hochwasserschutz
- Bewertung der Nährstoffretention
- Bewertung des Artenreichtums

Über diese Größen hinaus gibt es weitere Wirkungen (Kosten und Nutzen) von Flussauen, z. B. kann es zu Verbesserungen des lokalen Klimas kommen, ebenso gibt es Wirkungen auf den Wasserhaushalt und die Grundwasserneubildung. Allerdings konnten diese Wirkungen im Rahmen dieses Fallbeispiels nicht quantifiziert werden, da es insbesondere zur monetären Bewertung an Daten mangelt.

Die weiteren Berechnungen werden für 90 Jahre ermittelt. Maßnahmen zur Veränderung der Ökosysteme wirken langfristig, und erzielen ihren vollen Effekt erst nach einigen Jahren oder sogar Jahrzehnten. Aufgrund dieser Tatsache und wegen der großen Synergien mit den Bestrebungen unter der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt der Bundesregierung sollte mit derartigen Maßnahmen bereits heute begonnen werden.

### Kostenschätzung

Zielaskowski & Lüderitz (2004) geben auf der Basis von Berechnungen der Planungsgesellschaft für Wasserbau & Wasserwirtschaft mbH Neuruppin (PROWA) folgende Kostengrößen an:

- 3.750.000 Euro für den Rückbau und die Schlitzung der vorhandenen Deiche
- 5.600.000 Euro für den Deichneubau bzw. -sanierung
- 516.000 Euro für den Ankauf von landwirtschaftlichen Flächen (160 ha)

Die insgesamt berechneten Kosten betragen 9,8 Mio. Euro. Für diese Ergebnisse ist jedoch kein Berechnungsweg dokumentiert, so dass im Folgenden Berechnungen auf Basis anderer

Veröffentlichungen durchgeführt werden, in denen die getroffenen Annahmen transparent festgehalten werden.

***Kosten für Deichbau und –rückbau, Deichschlitzung und geringere Unterhaltungskosten des Deichs***

Allgemeine Angaben zu Kosten für Deichbauten variieren stark, so gibt Oelze (2004) Kosten in Höhe von ca. 900 Euro/m an. Dehnhardt & Meyerhoff (2002) nehmen Neubaukosten von Deichen von 2.200 bis 2.700 Euro/m an. Großmann et al (2010) geben auf der Basis verschiedener Deichbauprojekte eine Spannbreite von 1.500 bis 2.800 Euro/m an. Für den Neubau von 8 km Deich läge die Spannbreite zwischen 7,2 bis 22,4 Mio. Euro.

Diese Werte sind durchaus mit den Berechnungen von PROWA vergleichbar, wenn berücksichtigt wird, dass der vorhandene Deich im Fallbeispiel nur saniert bzw. ausgebaut werden muss. Für Deichsanierungen nennen IKSE (2003) Kosten von 521 – 2.500 Euro/m und einen Median von 910 Euro/m. Dehnhardt & Meyerhoff (2002) rechnen mit Sanierungskosten von ca. 700 Euro/m, was ca. ein Drittel der von ihnen geschätzten Neubaukosten entspricht. Damit ergeben sich für 8 km Deichsanierung bei einer Spanne von 700 bis 910 Euro/m Kosten in Höhe von 5,6 bis 7,3 Mio. Euro. Da keine Daten zum momentanen Zustand des bisherigen Deiches gefunden werden konnten, wird angenommen, dass dieser derzeit nicht zur Sanierung vorgesehen ist. Somit ist anzunehmen, dass die (zusätzlichen) Sanierungskosten nicht im Rahmen einer regulären Instanthaltung ohnehin anfallen könnten.

Allerdings reduzieren sich die Unterhaltungskosten für den Deich, da der neue Elbedeich um ca. 3 km kürzer ist. Unterhaltungskosten liegen laut Literatur zwischen 0,08 und 0,25 Euro/$m^2$ pro Jahr (Bronstert 2004, Dehnhardt & Meyerhoff 2002). Wie bei Grossmann et al. (2010) wird hier ein Deichunterhaltungsstreifen von 5 m angenommen. Für die eingesparte Deichlänge von 3 km ergibt sich eine geringere Fläche zur Deichunterhaltung von 15.000 $m^2$. Mit den oben angegebenen Unterhaltungskosten führt die Deichrückverlegung zu Ersparnissen von 1.200 bis 3.750 Euro pro Jahr.

Für die Schlitzung des vorhandenen Deiches fallen ebenfalls Kosten an. Hecht & Karl (2002) gehen von 5.000 Euro pro km abgetragenen Deich aus. Grossman et al (2010) rechnen mit einer Spanne von 4.000 bis 6.000 Euro/km. Wenn die Bandbreite von 4.000 bis 6.000 Euro/km auf die 7,5 km abgetragenen Deich in unserem Beispiel bezogen wird, fallen 30.000 bis 45.000 Euro für die Deichschlitzung an.

**Tabelle 60: Deichbau und -rückbaukosten**

| Kostenkomponenten | Kosten |
|---|---|
| **Kostenerhöhung** | |
| **Deichbau (8 km Sanierung des Deichs)** | 5,6 – 7,3 Mio. Euro |
| **Deichschlitzung** | 30.000 – 45.000 Euro |
| **Kosteneinsparung** | |
| **Kosteneinsparung für Deichunterhaltung (3 km kürzerer Deich)** | 1.200 – 3.750 Euro pro Jahr |

Da die Deichbau- und -rückbaukosten heute direkt anfallen, liegen die diskontierten Werte ebenfalls bei 5,6 bis 7,3 Mio. Euro für den Deichbau und zwischen 30.000 und 45.000 Euro für die Deichschlitzung. Die Kosteneinsparungen für die Deichunterhaltungen fallen jährlich an und betragen diskontiert bis 2100 0,04 bis 0,12 Mio. Euro.

### *Kosten für den Ankauf von Flächen*

Eine weitere Kostenkomponente sind Entschädigungszahlungen für die bisherigen Nutzer bzw. der Kauf von Flächen. In unserem Beispiel an der Garbeniederung werden die Flächen zurzeit als Grünland oder als Ackerland genutzt (Zielaskowski 2004). Da die Fläche auch bisher schon als Polder genutzt wird, muss kein Rückbau von Gebäuden oder Infrastruktur erfolgen. Die Flächen befinden sich zum Großteil in privatem Besitz. Zielaskowski & Lüditz (2004) nehmen einen notwendigen Ankauf von 160 ha Fläche an. Hier soll noch eine zweite Variante mit einem Ankauf von 300 ha als oberer Wert berechnet werden.

Für Sachsen-Anhalt liegen Kaufwerte für landwirtschaftliche Flächen aus dem Jahr 2009 vor, welche einen Wert von ca. 4.600 Euro/ha aufweisen (bei einer Ertragsmesszahl[48] etwas über 50, was ca. dem Fallbeispiel entspricht) (Statistisches Bundesamt 2010). Die Kaufwerte von landwirtschaftlichen Flächen variieren über das Bundesgebiet deutlich. In dem direkt an das Fallbeispiel angrenzenden Bundesland Niedersachsen werden landwirtschaftliche Flächen mit einer Ertragsmesszahl von 50 mit einem durchschnittlichen Kaufwert von ca. 13.000 Euro/ha aufgeführt (Grünland 10.000 Euro/ha, Ackerland 16.000 Euro/ha). (Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen 2010). Das Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011) gibt für die gleiche Ertragsmesszahl einen Wert von ca. 25.000 Euro/ha an. Zudem variieren die Preise je nach Ertragsmesszahl. Nach dem Statistischen Bundesamt (2010) liegt der deutsche Durchschnitt über alle landwirtschaftlichen Flächen bei 11.000 Euro/ha. Unterschiedliche Werte für Grün- und Ackerland konnten nur für Niedersachsen gefunden werden, so dass hier die Durchschnittswerte verwendet werden.

Für den Fall in Sachsen-Anhalt kostet der Ankauf von 160 bis 300 ha landwirtschaftlicher Fläche zwischen 736.000 und 1,4 Mio. Euro. Für den allgemeineren Fall wird mit den deutschen Durchschnittswerten gerechnet, die Kosten für den Flächenkauf liegen zwischen 1,76 und 3,3 Mio. Euro. Hier fallen die Kosten ebenfalls heute an, so dass die berechneten Kosten den diskontierten Werten entsprechen.

Da in dem vorliegenden Fall keine weiteren Gebäude oder sonstige Nutzungen vorliegen (abgesehen von der Nutzung als Grünland und Acker), sind die Werte für Entschädigung und Ankauf der Flächen relativ niedrig. Dies wird deutlich, wenn man die Situation mit einer intensiver genutzten Fläche vergleicht: Bronstet (2004) errechnen für die Neuzeller Niederung an der Oder Kosten zwischen 7,2 und 16 Mio. Euro für die Entschädigung bzw. den Ersatz von 200 - 500 Gebäuden, zum Großteil Wochenendhäuser.. Das Untersuchungsgebiet an der Oder ist mit 1.400 bis 1.700 ha Retentionsfläche (je nach Variante) deutlich größer als das hier behandelte Fallbeispiel, kann aber bei der Einordung der oben berechneten Werte helfen.

[48] Die Ertragsmesszahl schätzt die Wertigkeit des Ackerboden ein.

### *Ertragsverlust der landwirtschaftlichen Flächen*

Neben den Kosten für die Kommune, die Länder oder den Bund, die Kosten für das Einrichten der Retentionsflächen übernehmen, treten Kosten durch geringere Ernteerträge auf, wenn die Nutzung der Überflutungsflächen eingeschränkt wird. Zielaskowski (2004) schlagen vor, das Gebiet der Hohen Garbe, das momentan schon als Überflutungsgebiet der Elbe dient, als Kernzone des Biosphärenreservats auszuweisen. Damit wäre eine landwirtschaftliche Nutzung dort nicht mehr möglich. Bisher sind dort Grünlandflächen in der Größe von ca. 60 ha und ca. 20 ha an Ackerflächen vorhanden. Das zweite Gebiet, die Garbeniederung, wird auf 60 ha für Ackerbau genutzt und 300 ha für Grünland. Die extensive Ackerbaunutzung wird in einem Überflutungsgebiet nicht mehr möglich sein. Das Grünland kann jedoch als Feuchtgrünland bewirtschaftet werden, so dass trotz der Nutzung eine regelmäßige Überflutung möglich ist.

Rühs (2003) stellt verschiedene Deckungsbeiträge für landwirtschaftliche Nutzungen bei einer Einrichtung von Auenwäldern zusammen. Förderungen der EU sind dabei schon inbegriffen.

**Tabelle 61: Deckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Nutzung**

| Landwirtschaftliche Nutzung | Deckungsbeitrag (Euro/ha*a) |
|---|---|
| Ackerbau | 553 bis 660 |
| Intensives Grünland | 1.084 bis 1.853 |
| Mesophiles Grünland | 444 bis 1.197 |

*Quelle: Rühs (2003)*

**Tabelle 62: Ertragsverlust durch Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzung im Fallbeispiel**

| Umwidmung der landwirtschaftlichen Fläche | Ertragsverlust (Euro/a) |
|---|---|
| Verlust 20 h Ackerfläche | 11.060 – 13.200 |
| Verlust 60 h mesophiles Grünland | 26.640 – 71.820 |
| Veränderung von 60 ha Ackerbau zu mesophiles Grünland | 0 - 6.540 |
| Veränderung von 300 ha intensives Grünland zu mesophiles Grünland | 192.000 – 196.800 |
| **Summe** | **229.700 – 288.360** |

Als Einnahmeausfall für die Fläche, die zur Kernzone umgewidmet wird, entsteht ein Verlust von 37.000 bis 84.000 Euro pro Jahr. Für die Veränderung der landwirtschaftlichen Fläche entsteht ein relativ hoher Ertragsverlust bei der Veränderung der Grünlandnutzung von ca. 200.000 Euro pro Jahr. Nach Rühs (2003) bringt das zu Grünland umgenutzte Ackerland sogar einen höheren Ertrag, da als Futtermittel in der Tierhaltung eingesetzt, ein höherer Gewinn für den Landwirt entsteht. Die Möglichkeit, dass eine Umwandlung den Ertrag erhöht, wird hier jedoch nicht weiter verfolgt, zumal diese Option dem Landwirt auch in der Vergangenheit schon offen gestanden hätte. Insgesamt verringert sich der

landwirtschaftliche Ertrag somit um 230.000 und 290.000 Euro pro Jahr, wenn die Auenflächen im Fallbeispiel eingerichtet werden. Abdiskontiert für die Jahre bis 2100 ergibt sich ein verminderter Ertrag zwischen 7,3 und 9,2 Mio. Euro.

### *Anpflanzung von Auenwaldbestand*

Weiterhin sind auch Kosten für die Pflanzung von Auenwaldbeständen einzurechnen. Die DUH schätzt die Kosten mit 20.000 Euro für eine Fläche von 100 ha neugepflanzte Auenwaldfläche (für das Beispiel Deichrückverlegung Lenzen) und damit Kosten in Höhe von 200 Euro/ha (DUH 2011).

Um einen Auenwald zu entwickeln, ist es nicht nötig die Fläche vollständig zu bepflanzen, da die Vegetation sich sukzessive auf angrenzende Flächen ausbreitet. Da auf der Fläche bereits teilweise Auenwald vorhanden ist, kann mit einem gewissen Anteil an Sukzessionsflächen gerechnet werden. Im Beispiel Lenzen ist das Ziel ca. 300 ha Auenwald, davon werden 100 ha neu angepflanzt, 100 ha ist als Sukzessionsfläche vorgesehen, 100 ha waren vor der Deichrückverlegung schon vorhanden bzw. angelegt worden (Trägerverbund Burg Lenzen e.V. 2011).

Zielaskowski (2004) gibt an, dass auf dem Abschnitt Hohe Garbe, der zurzeit schon als Überschwemmungsfläche zur Verfügung steht, auf etwa der Hälfte der Fläche bereits Auenwald steht. Der Anteil hier könnte weiter erhöht werden, z.B. mit einer Anpflanzung von weiteren 20 ha Auenwald. Ein Teil der Garbeniederung soll nach der Deichrückverlegung als Grünflächen zur Verfügung stehen. Neben einem kleinen Anteil Auenwald im Südwesten ist keine Auenvegetation vorhanden. Hier sollte ebenfalls eine Anpflanzung zwischen 50 und 100 ha erfolgen. Insgesamt können für die vorgeschlagene Fläche von 70 bis 120 ha Anpflanzungskosten von 14.000 bis 24.000 Euro angesetzt werden, diese verteilen sich gleichmäßig über die ersten zehn Jahre.

**Tabelle 63: Kosten für die Anpflanzung von Auenwald**

| Anpflanzung von Auenwaldbeständen | Kosten (in Euro) |
|---|---|
| Hohe Garbe (ca. 20 ha) | 4.000 |
| Garbeniederung (ca. 50 bis 100 ha) | 10.000 – 20.000 |
| **Gesamt (ca. 70 – 120 ha)** | 14.000 – 24.000 |

Die diskontierten Kosten der Anpflanzung betragen zwischen 0,01 und 0,02 Mio. Euro.

## Bewertung der Nutzen

### *Bewertung der Nährstoffretention*

Eine wichtige Funktion der Auen ist es, dem Flusswasser Nährstoffe zu entziehen. Durch die geringeren Fließgeschwindigkeiten in den Auenflächen lagern sich die mitgeführten Sedimente und damit auch die mitgeführten Nährstoffe am Boden der Auen ab. Besonders Phosphor kann so dem Wasser entzogen werden. Die Auenböden denitrifizieren ebenfalls einen Teil des im Wasser gelösten Nitrats, was die Nährstoffbelastung der Gewässer verringert (inkl. Nord- und Ostsee) und die Qualität des Grund- und Oberflächenwassers

erhöht (Andersen 2003). Die Retentionsleistung ist wesentlich von der überfluteten Fläche und der Dauer der Überflutung abhängig.

Nur bei einem regelmäßigen Wechsel von Überflutungs- und Trockenphasen bilden sich Auen mit ihrer typischen Vegetation aus. Die Fläche sollte daher so angelegt sein, dass mindestens einmal jährlich ein Großteil der Fläche überflutet wird. Hier soll angenommen werden, dass 50 % der Fläche, d.h. ca. 300 ha überflutet werden. Nach Bronstert (2004) stehen die Flächen je nach Ereignis dann zwischen ein und drei Wochen unter Wasser. Große Hochwasser können bis zu 100% der Fläche überschwemmen, treten aber nur relativ selten auf (z.B. bei einem 50-jährigen Hochwasserereignis). Aufgrund von Annahmen über verschiedene Hochwasserereignisse und das Überflutungsausmaß soll durchschnittlich von 12 bis 33 ha pro Tag ausgegangen werden.

Für die spezifischen Nährstoffretentionen berechnet Dehnhardt (2002) für zwei verschiedene Elbestandorte Werte zwischen 7,4 und 18 kg N pro Hektar überfluteter Fläche und Tag. Hoffmann & Baattrup-Pedersen (2007) nennen Werte zwischen 1 - 1,5 kg Stickstoff pro Hektar überfluteter Fläche und Tag und für Phosphor zwischen 0,2 - 1,2 kg pro Hektar überfluteter Fläche und Tag. Andere Quellen rechnen mit einer Stickstoffretention zwischen 0,2 und 2 kg Stickstoff pro Hektar überfluteter Fläche und Tag (vgl. Van der Lee et al. 2004). Analog zu Grossmann et al. (2010) soll bei der hier durchgeführten Berechnung auf den Werten von Hoffmann et al. (2007) aufgebaut werden, da Dehnhardt (2002) die Phosphorretention nicht untersuchte.

Der monetäre Nutzen wird anhand der für diesen Fall verbreiteten Ersatzkostenmethode berechnet, d.h. der Nutzen wird geschätzt anhand der vermiedenen Kosten für alternative Verfahren, welche die selbe Leistung (Minderung der Nährstoffkonzentration) erbringen. Hierzu dienen Kosten für Maßnahmen in Kläranlagen und in der Landwirtschaft. Angaben in der Literatur variieren hierfür sehr stark. Böhm et al. (2002) geben für Stickstoff Kosten zwischen 0,5 und 30 Euro pro kg vermiedener Stickstoff und 5 und 500 Euro pro kg vermiedener Phosphor an. Dehnhardt (2002) verwenden 2,5 – 7,5 Euro/kg Stickstoff.

Die Nährstoffkonzentrationen bzw. die Kosten für Maßnahmen zur Reduktion könnten sich durch den Klimawandel und weitere Anpassungsmaßnahmen verändern. Die Folgen des Klimawandels (größere Trockenheit und weiter voranschreitende Bodenerosion sowie zurückgehende Bodenfruchtbarkeit) können dazu führen, dass einerseits mehr Düngemittel eingesetzt werden (vgl. Pimentel et al. 1995, Iglesias 2007) und andererseits die Sedimentfracht steigt, und damit auch die Belastung der Gewässer mit Nährstoffen zunimmt. Dies macht die Leistung von Retentionsflächen zum Senken der Nährstoffkonzentration tendenziell wertvoller. Auf der anderen Seite können Anpassungsmaßnahmen zu veränderten Bodenbearbeitungsmethoden in der Landwirtschaft und die laufenden Anstrengungen im Rahmen der EU-Wasserrahmenrichtlinie die Nährstofffracht mindern.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten wird hier weiterhin von Werten innerhalb der oben genannten Bandbreiten von 5 – 10 Euro/kg Stickstoff und 10 – 20 Euro/kg Phosphor ausgegangen. Der Nutzen der Reduktion der Nährstoffbelastung beträgt dementsprechend zwischen 33.000 und 515.000 Euro pro Jahr für die Nährstoffretention in der hier untersuchten Aue. Werden diese Ergebnisse für die Jahre 2011 bis 2100 auf heute abdiskontiert, ergibt sich ein Nutzen durch die Nährstoffretention zwischen 1,06 und 16,45 Mio. Euro.

### *Wertschätzung des Artenreichtums*

Für die Bewertung der Habitatfunktion renaturierter Auenlandschaften und deren Lebensraumfunktion ermittelte Meyerhoff (2002) Zahlungsbereitschaften. Meyerhoff (2002) interviewten 1.300 Personen in der Nähe von Elbe, Weser und Rhein und befragten sie nach möglichen Maßnahmen, die zu einem verbesserten Schutz der biologischen Vielfalt beitragen, und in welcher Höhe sie sich an derartigen Aktivitäten finanziell beteiligen würden. Es wurde eher konservativ gerechnet, da die Zahlung einmal pro Haushalt angenommen wurde und nicht, wie in der Studie abgefragt, pro Person. Die Bestimmung erfolgte bei Dehnhardt & Meyerhoff (2002) für die Haushalte in den Flusseinzugsgebieten und ergab zwischen 108 und 153 Euro pro Jahr für eine Fläche von 55.000 ha aktivierter Aue. Umgerechnet auf die in der Studie betrachtete Fläche ergeben sich Zahlungsbereitschaften in Höhe von 1.963 Euro/ha revitalisierte Aue pro Jahr. Bei Dehnhardt & Meyerhoff (2002) wird auch ein Maximalwert von 7.200 Euro/ha berechnet. Dieser wird hier aber nicht verwendet.

Es wird angenommen, dass die Diskussionen um Klimafolgen und ihre Auswirkungen auf den Artenreichtum, zu einer höheren Wertschätzung für vitale Ökosysteme führt (vgl. BMU 2007b, TEEB 2009, Naumann et al 2011), so dass neben dem Ergebnis der Studie von Dehnhardt und Meyerhoff ein zweiter höherer Wert mit 3.000 Euro/ha pro Jahr angenommen wird. Hier wird ebenfalls von einer Zahlungsbereitschaft von 20 Jahren ausgegangen. Die Bandbreite der angenommenen Werte liegt damit zwischen 2.000 und 3.000 Euro/ha pro Jahr. Für die 611 ha renaturierte Fläche betrüge die Zahlungsbereitschaft folglich zwischen 1,2 und 1,8 Mio. Euro pro Jahr (für die nächsten 20 Jahre). Diskontiert beträgt der Nutzen für das Szenario ohne Klimawandel (2.000 Euro pro Jahr) 18 Mio. Euro, mit Klimawandel (3.000 Euro pro Jahr) 27,6 Mio. Euro.

### *Nutzen für den Hochwasserschutz*

Neben den bisher genannten Nutzen bieten Auen Schutz vor Hochwasserereignissen. Die Effekte eingerichteter Retentionsflächen wurden für verschiedene Projekte berechnet, so ergaben Modellierungen für die Auenfläche an der Lenzener Elbtalaue (ca. 400 ha) eine Reduktion des Hochwasserpegels von 9 bis fast 40 cm (je nach Hochwasserereignis). Im 20 km entfernten Wittenberge kann noch ein Maximaleffekt von 5 cm erreicht werden (ab HQ20-25). Das Projekt „Lödderitzer Forst“ erreicht eine Wasserspiegelabsenkung im Hochwasserfall von bis zu 28 cm. Die Effekte sind damit eher regional; nur verschiedene Deichrückverlegungsmaßnahmen gemeinsam können überregional spürbare Auswirkungen erzeugen (Trägerverbund Burg Lenzen e.V. 2011; LHW 2010).

Da im Rahmen dieses Projekts keine Modellierungen der Hochwasserereignisse für die Garbeniederung möglich waren, da diese zwischen Lenzener Elbtalaue und Wittenberge liegt, wird angenommen, dass wesentliche Hochwasserschutzeffekte in Wittenberge erreicht werden können.

Bronstert (2004) hat für einen Flutpolder in der Havelniederung den Nutzen über die Verhinderung von Hochwasserschäden in Wittenberge berechnet. Das Hochwasserereignis von 2002 wurde zugrunde gelegt, das in etwa einem 25-jährlichem Hochwasserereignis (HQ25) in der Region entsprach. Dieses Ereignis würde in Wittenberge einen Schaden zwischen 13,42 und 20,17 Mio. Euro verursachen. Die betrachtete Retentionsfläche trägt nur anteilig zu einem vermiedenen Schaden bei, geschätzt etwa in der Höhe von 2 bis 5% der

angenommenen Schadenssumme, dies entspricht etwa 268.000 bis 1 Mio. Euro. pro Ereignis (alle 25 Jahre). Wenn nun angenommen wird, dass durch den Klimawandel ein Hochwasserereignis in diesem Ausmaß ab 2030 aller 20 Jahre, und ab 2050 alle 12,5 eintritt, steigt der Nutzen entsprechend.

Für das Szenario ohne Klimawandel ist der diskontierte Nutzen (bis 2100) zwischen 0,5 und 1,85 Mio. Euro. Für die häufigeren Ereignisse unter Klimawandel erhöhen sich die Werte auf 0,65 bis 2,46 Mio. Euro.

Bronstert (2004) berechnet ebenfalls die ereignisabhängigen Kosten für eine Flutung von Poldern, um die Stadt Wittenberge zu schützen. Diese Flutungen erfolgen zurzeit im Hochwasserfall. Als Nutzenbestandteile gehen die vermiedenen Schäden an Bauwerken, Straßen, landwirtschaftlichen Nutzflächen, Fischbestand sowie Sprengung und Rekonstruktion von Deichen. Leider liegen die Einzelkomponenten der Berechnung nicht vor, so dass hier nur die Ergebnisse als Vergleich angeführt werden können. Diese betragen diskontiert für den Zeitraum von 90 Jahren (Diskontrate 3%) für das Elbehochwasser 2002 zwischen 0,88 und 1,55 Mio. Euro, für ein Ereignis mit höherer Intensität zwischen 1,11 und 1,99 Mio. Euro. Die oben hergeleiteten Werte für den Nutzen der Maßnahme liegen damit eher unter den Ergebnissen, zu denen Bronstert (2004) kommt.

### Vergleich Kosten und Nutzen

Da die Kosten für die Maßnahme zum Großteil zu Beginn anfallen, der Nutzen aber erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts eintreten wird, werden die ermittelten Kosten- und Nutzenwerte diskontiert. Bei einem Diskontsatz von 3 % (gemäß UBA-Methodenkonvention, UBA 2007a) ergeben sich für die nächsten 90 Jahre (bis 2100) folgende Werte:

**Tabelle 64: Kosten und Nutzen des Fallbeispiels zur Renaturierung von Auenflächen**

| | Szenario ohne Klimawandel (BAU)<br>in Mio. Euro (für 2011-2100, diskontiert mit 3%) | Szenario mit Klimawandel<br>in Mio. Euro (für 2011-2100, diskontiert mit 3%) |
|---|---|---|
| **Kostenerhöhung** | | |
| Deichbau | 5,6 - 7,3 | 5,6 - 7,3 |
| Deichschlitzung | 0,03 - 0,05 | 0,03 - 0,05 |
| Flächenankauf | 0,74 – 1,4 | 0,74 – 1,4 |
| Ertragsverlust | 7,33 – 9,21 | 7,33 – 9,21 |
| Anpflanzung | 0,01 – 0,02 | 0,01 – 0,02 |
| **Kosteneinsparung** | | |
| Kosteneinsparung bei Deich-Unterhaltskosten | -0,04 - -0,12 | -0,04 - -0,12 |
| **Summe aller Kostengrößen** | **13,67 - 17,86** | **13,67 - 17,86** |
| **Nutzen** | | |
| Nährstoffretention | 1,06 – 16,45 | 1,06 – 16,45 |
| Wertschätzung Artenreichtum | 18,39 | 27,58 |
| Hochwasserschutz | 0,5 – 1,85 | 0,65 – 2,46 |
| **Summe aller Nutzenwerte** | **19,95 – 36,69** | **29,29 – 46,49** |

**Tabelle 65: Differenz zwischen Minimum- /Maximum-Szenario**

| Differenz zwischen beiden Szenarien | in Mio. Euro (für 2011-2100, diskontiert mit 3%) |
|---|---|
| Differenz Wertschätzung Artenreichtum | 9,19 |
| Differenz Hochwasserschutz | 0,15 – 0,61 |
| **Summe nur höheren Nutzens bei Klimaveränderungen** | **9,34 – 9,8** |

Die größten Kostenfaktoren sind der Bau eines neuen Deichabschnitts und der Ertragsverlusts auf den landwirtschaftlichen Flächen. Die Kosten für die Deichschlitzung und geringere Unterhaltungskosten am Deich machen nur einen sehr geringen Teil der Kosten aus. Die Kosten für den Flächenankauf waren in dem dargestellten Beispiel gering, da die Grundstückspreise in der Region relativ niedrig sind.

Die Wertschätzung des Artenreichtums macht die größte Nutzenkomponente aus. Der Nutzen des Nährstoffrückhalts zeigt eine sehr große Bandbreite, da Retentionsfunktion von Auen in der Literatur sehr unterschiedlich eingeschätzt wird. Zudem bestehen Unsicherheiten bei der Dauer und Häufigkeit der Überflutungen - und nur wenn die Fläche überflutet wird, kann auch eine Nährstoffablagerung und -abbau erfolgen.

Die Rechnung zeigt, dass sich die Kostengrößen durch den Klimawandel nicht verändern. Der Nutzen der Maßnahme steigt dagegen, wenn die Klimaänderungen berücksichtigt werden: die Wertschätzung für biologische Vielfalt steigt ebenso wie der Nutzen durch verhinderte Hochwasserschäden.

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis der Maßnahme ist bereits ohne die Auswirkungen des Klimawandels positiv. Wenn zusätzlich erhöhte klimawandelbedingte Nutzen in das Verhältnis einbezogen werden, gilt dies umso mehr.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Renaturierung von Ökosystemen mit einer reichen Artenvielfalt stellt eine wirksame Maßnahme dar, um den Auswirkungen des Klimawandels zu begegnen. Der Schutz der biologischen Vielfalt stellt ohnehin, auch ohne Berücksichtigung des Klimawandels, eine bedeutende und dringende Herausforderung dar; durch den Klimawandel – und die damit verbundenen Belastungen für Ökosysteme und Artenvielfalt – verstärkt sich die Dringlichkeit nochmals. Als Anpassungsmaßnahmen sind dabei Projekte besonders bedeutend, die intakte Ökosysteme bewahren bzw. wiederherstellen, sowie Maßnahmen, die Wanderungsbewegungen von Pflanzen und Tieren ermöglichen, besonders Verbünde von geschützten Gebieten. Das Einrichten von Auenflächen kann beiden Zielen dienen. Daneben zeigen sich Synergien mit dem Hochwasserschutz. Da durch den Klimawandel häufigere und stärkere Hochwasser zu erwarten sind (vgl. Regionaler Klimaatlas 2011) wird die Bedeutung des Hochwasserschutzes in den nächsten Jahren noch zunehmen.

Die Renaturierung von Auenflächen kann aufgrund ihres Artenreichtums die biologische Vielfalt bewahren bzw. erhöhen, und stärkt so die Kapazität der Ökosysteme, sich an verändernde Klimabedingungen anzupassen. Das Einrichten von großen zusammenhängenden Auenwäldern (als Schutzgebiete) unterstützt Wanderungsbewegungen und die Verschiebung von Lebensräumen. Für die Finanzierung von Naturschutzprojekten kommt weitgehend die öffentliche Hand auf. Zum Teil sind auch Umweltorganisationen über Spendengelder beteiligt, z.B. finanziert der WWF das Projekt Lödderitzer Forst zu 10 % (WWF 2011). Das Risiko von Mitnahmeeffekten, wenn solche Projekte mit öffentlichen Geldern finanziert werden, ist gering. Die Maßnahme hat eine lang anhaltende Wirkung, soweit die Fläche regelmäßig zwischen feuchten und trockenen Phasen wechselt, damit sich eine vitale Auenlandschaft entwickeln kann. Das Einrichten von Retentionsflächen an Flussgewässern fördert die Entwicklung hin zu einem natürlichen Hochwasserschutz. Die Wirkung zeigt sich lokal bis regional, je nach Größe der einzelnen Maßnahmen und deren Einbettung in einen Gesamtverbund von Maßnahmen.

Die Wertschätzung für Maßnahmen zur Erhöhung des Artenreichtums ist in der Bevölkerung allgemein hoch (vgl. z.B. Hampicke et al. 1991). Neben der Erhöhung der biologischen Vielfalt eröffnen Auenrevitalisierungsmaßnahmen auch neue Möglichkeiten für die Naherholung. Allerdings kann es trotzdem zu Akzeptanzproblemen bei der Umsetzung von Projekten kommen, vor allem wenn landwirtschaftliche Flächen umgewidmet oder andere Nutzungen eingeschränkt werden, bis hin zum Rückbau von privaten Gebäuden oder Anlagen.

Die Maßnahme ist eine no-regret Maßnahme, da der Schutz der biologischen Vielfalt ohnehin dringend geboten ist, und zu den wichtigsten umweltpolitischen Zielen auf nationaler Ebene, EU-Ebene und international zählt (BMU 2007a, Europäische Kommission 2011). Die Maßnahme wirkt unabhängig vom Ausmaß der Klimaveränderungen und ist damit szenario-variabel.

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis ist für die Renaturierung von Auen positiv. Das Verhältnis verbessert sich noch, wenn die größeren Nutzen durch das veränderte Klima einbezogen werden. Neben den einbezogenen fallen weitere Nutzen der Maßnahme an, die in dieser Darstellung nicht quantifiziert wurden, z.B. der Erholungswert eines vitalen Auenwaldes.

Die Kostengrößen sind für die Maßnahme relativ gut zu bestimmen. Die unsichere Datenlage bezieht sich im hier untersuchten Beispiel vor allem auf die Hochwasserschäden unter Klimawandelbedingungen; um diese genauer zu bestimmen, wären ausführlichere lokale und regionale Modellierungen notwendig. Ebenfalls genauer zu untersuchen bleibt, wie sich die Bewertung eines verbesserten Artenschutzes verändert, wenn durch den Klimawandel der Druck auf die verbleibenden Ökosysteme zunimmt.

## Tabelle 66: Auswertung der Maßnahme „Renaturierung von Auenlandschaften“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke | Der Erhalt der biologischen Vielfalt, Stärkung des Artenreichtums ist unserer Lebensgrundlage und dadurch ein vorrangiges Ziel der Umweltpolitik. |
| **Effektivität** | Hoch | Die Maßnahme ist effektiv, um die Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen zu unterstützen. Die hier vorliegende Maßnahme hat auch eine lokale Wirkung auf den Hochwasserschutz. Die Wirkung hängt dabei vom Ausmaß der Ereignisse ab. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Mitnahmeeffekte sind gering bis nicht vorhanden, da ohnehin i.d.R. fast vollständig öffentlich finanziert. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die Wirkung tritt langanhaltend auf. Anreizwirkung besteht für einen natürlichen Hochwasserschutz. |
| **Reichweite** | Lokal/regional | Je nach Größe des Projekts lokal bis regional. |
| **Akzeptanz** | Mittel/hoch | Sensibilisierung ist bei politischen Akteuren und bei der Bevölkerung vorhanden. Seit Hochwässern 1997/2002 Sensibilität auch für einen natürlichen Hochwasserschutz erhöht. Im konkreten Projektfall können aber Akzeptanzprobleme auftreten, vor allem durch Nutzungsänderung der Flächen und evtl. Rückbau von Gebäuden. |
| **Regret/No-regret** | No-regret | Maßnahmen zum Artenschutz auch ohne Klimawandel erforderlich. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Aufgrund der bereits heute vorliegenden Problemlage ist die Maßnahme szenario-variabel. Bei stärkeren Klimaänderungen wird die Wirkung noch erhöht. |

# 3.10 Handlungsfeld Landwirtschaft

## 3.10.1 Anpassungsmaßnahme „Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Die Beregnung von Ackerflächen in Deutschland wird bereits bei 3% der Anbauflächen durchgeführt. Dies sind vor allem landwirtschaftliche Kulturen wie Getreide, Hackfrüchte, Hülsen- und Ölfrüchte sowie gärtnerische Kulturen, unter anderem Gemüse und Zierpflanzen (vgl. Fricke, E.; Heidorn, H. 2003; Umweltbundesamt 2011) Nach aktuellen Klimaprognosen sinkt die Regenmenge in Deutschland in den Sommermonaten, in denen auch die Wachstumsphase vieler Sorten liegen, im Mittel um 21 % bis 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 (vgl. Regionaler Klimaatlas Deutschland 2011). Nach De Groot (2006) wird aufgrund der steigenden Trockenheit der Anbau von Sommergemüse, Salat, Obst inkl. Baumobst und Blumen nur noch möglich sein, wenn die entsprechenden Felder bewässert werden. Die Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen ist damit eine objektorientierte Maßnahme, die für die Anpassung in der Landwirtschaft wichtig ist. Ebenfalls ist sie notwendig, um verschiedene Nahrungsmittel überhaupt weiterhin in Deutschland produzieren zu können. Private Akteure, speziell die Landwirte, führen diese Maßnahmen vollständig durch. Die öffentliche Hand ist als Akteur in der Umsetzung nicht notwendig. Da die Maßnahmen die Erwerbsgrundlage der Landwirte sichert, ist davon auszugehen, dass diese auch einen Teil der Finanzierung übernehmen würden. Als Alternative könnten die Bauern aber auch auf andere Früchte umsteigen, die auch ohne eine Bewässerung weiterhin angebaut werden können. Um die privaten Investitionen zu fördern, könnte es sinnvoll sein, die hohen Installationskosten durch öffentliche Fördermaßnahmen zu unterstützen. Da durch die auftretende Trockenheit mit dem vorhandenen Wasservolumen sparsam umzugehen ist, müsste evtl. rechtlich geregelt werden, dass wassereffiziente Bewässerungssysteme, wie die Tröpfchenbewässerung, eingesetzt werden. Diese sparsamen Beregnungsanlagen weisen aber im Vergleich zu anderen Arten der Beregnung sehr hohe Kosten auf. Der Zeithorizont bis zur Umsetzung ist mittel bis lang. Die Maßnahme wirkt direkt nach der Installation und braucht keinen größeren Vorlauf. Die Lebensdauer wird mit minimal 10 Jahren angegeben.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Um das Flächenpotential für diese Maßnahme abzuschätzen, wurden die Anbaufläche für Gemüsesorten (unterteilt nach Hackfrüchte, Hülsenfrüchte und Gemüse), Obst und Blumen zusammengetragen und die bereits beregneten Flächen gegengerechnet. Bei der bereits mit Beregnungsanlagen ausgestatteten Anbaufläche konnte aufgrund der Datenlage leider keine Unterscheidung in verschiedene Anbausorten vorgenommen werden, so dass die ganze Fläche abgezogen wurde (siehe nachfolgende Tabelle). Daraus entsteht ein Potential von 350.000 ha, welche mit Beregnungsanlagen ausgestattet werden müssten, um die entsprechenden Früchte in Deutschland anzubauen. Dies entspricht 2 % der deutschen landwirtschaftlichen Nutzfläche.

### Tabelle 67: Beregnungsfläche

| Kulturart/Fruchtart | Anbaufläche |
|---|---|
| Hackfrüchte | 629.000 ha |
| Hülsenfrüchte | 102.700 ha |
| Gemüse, Erdbeeren, Gartengewächse (Blumen+Zierpflanzen) | 135.300 ha |
| Baum- und Beerenobst einschl. Nüsse | 66.800 ha |
| Gesamt | 933.800 ha |
| Anbaufläche bereits beregnet | 560.000 ha |
| **Neue Fläche, für die Beregnung eingerichtet werden muss:** | **ca. 350.000 ha** |

*Quelle: Statistisches Bundesamt (2010); Umweltbundesamt (2011).*

De Groot (2006) nimmt für eine neue Einrichtung der Beregnung Investitionskosten in Höhe von einmalig 10.000 €/ha an. Darüber hinaus entstehen laufende Kosten von 90 – 300 €/ha pro Jahr bei der Nutzung von Oberflächenwasser, wobei die höchsten Kosten für den Gemüseanbau anfallen. Die laufenden Kosten setzen sich u.a. aus Kosten für Wartung, Reparaturen sowie Energie- und Wasserkosten zusammen. In anderen Literaturquellen sind auch geringere Investitionskosten für die Installation der Anlage zu finden, z.B. 2.400 bis 8.000 €/ha je nach Technik der Beregnungsanlage (vgl. Landesanstalt für Pflanzenbau 2002). In dieser Quelle wird aber von deutlich höheren Betriebskosten pro Jahr von 399 – 1.600 €/ha je nach genutzter Technik ausgegangen. In dieser Studie werden für die weitere Berechnung die Daten von De Groot (2006) verwendet.

Weiterhin schätzt De Groot (2006), dass der Ertrag durch steigende Trockenheit beim Kontroll-Szenario des IPCC um 22%, beim Umwelt-Szenario um 37% zurückgeht. Der Nutzen durch eine Bewässerung und die dadurch auftretende Ertragssteigerung wird auf dieser Basis je nach Anbausorte auf 213 – 1.045 €/ha pro Jahr geschätzt.

### Tabelle 68: Kosten für Bewässerung

| | Investitionskosten (zu Beginn, einmalig) | Laufende Kosten | Ertragssteigerung |
|---|---|---|---|
| Kosten/Nutzen | 10.000 €/ha | 90-300 €/ha*a | 213-1.045 €/ha*a |
| Kosten/Nutzen für zu beregnende Fläche von 350.000 ha | 3.500 Mio. €, bei Nutzungsdauer 10 Jahre: 350 Mio. €/a | 31,5 – 105 Mio. €/a | 74,6 – 366 Mio. €/a |
| **Gesamt** | **Kosten: 382 – 455 Mio. €/a** | | **Nutzen: 74,6 – 366 Mio. €/a** |

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis zeigt eine große Bandbreite. Die Wirtschaftlichkeit der Anpassungsmaßnahme ist in wenigen Fällen gegeben. Die Beregnungsanlagen sollte bei Anbausorten eingesetzt werden, bei denen durch eine Beregnung der Ertrag stark gesteigert werden kann. Darüber hinaus sollte die Gewinnmarge für die angebaute Sorte relativ hoch sein. Wie oben erwähnt, werden die Landwirte in diesen Fällen aus Eigeninteresse in die Beregnung von Nutzflächen investieren.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Bewässerung sichert die Erwerbsgrundlage für die Landwirtschaft. Ebenfalls stellt die Beregnung von landwirtschaftlichen Nutzflächen die Ernährungssicherheit bzw. den Anbau spezieller Pflanzensorten für die Bevölkerung sicher. Dabei wird eine Bewässerung nicht für alle Anbausorten notwendig sein, allerdings wird ein Anbau von Früchten wie Obst, Kartoffeln oder Zuckerrüben in Deutschland nur noch mit Hilfe von Bewässerung möglich sein. Den Ertragseinbußen in der landwirtschaftlichen Produktion kann mit Hilfe von Beregnungsanlagen gut entgegen gewirkt werden, wenn ein ausreichendes Wasserdargebot vorhanden ist. Mitnahmeeffekte treten nicht auf, da die Maßnahme von privaten Akteuren umgesetzt wird. Die Anpassungsmaßnahme zeigt nach der Installation einen vorübergehenden Effekt über die Lebensdauer der Anlage auf, der eine entsprechende Wartung der Technik voraussetzt. Allerdings ist der Einsatz von Bewässerungsanlagen immer von dem auftretenden Wasserdargebot abhängig, nur wenn dieses gewährleistet ist, kann auch Wasser für die Bewässerung entnommen werden. Die Maßnahmen zeigen eine lokale Wirkung für die entsprechend ausgestatten Ackerflächen. Langfristig könnte es zu Konflikten kommen, wenn in Trockenperioden Wasser für Bewässerung genutzt wird und damit die Knappheit für andere Wassernutzungen verschärft wird. Die Maßnahme fällt damit unter die Rubrik High-regret, da sie die Auswirkungen in anderen Handlungsfeldern eher noch verschlimmert. Die Wirkung der Maßnahme ist auch abhängig vom entsprechenden Klima-Szenario. Wenn die Niederschlagsmenge in der Wachstumsperiode der Pflanzen weniger stark zurückgeht, ist die Wirkung der Maßnahme eingeschränkt. Aber auch wenn langfristig sehr extreme Trockenperioden auftreten, ist ein Einsatz der Anlagen nicht mehr gewährleistet. Allerdings könnten die Anlagen bei den beschriebenen Anbausorten bereits heute eingesetzt werden und in Sommern mit niedrigen Niederschlagsmengen zu einer Ertragssteigerung führen.

Die Daten für die Kosten-Nutzen-Analyse wurden aus einer niederländischen Studie übernommen. Es wird angenommen, dass die Daten zum Ernterückgang und dem Auftreten von Trockenperioden auf Norddeutschland übertragen werden können. In Süddeutschland wird die Betroffenheit durch Trockenheit nach dem Regionalen Klimaatlas Deutschland tendenziell noch größer sein, so dass dies eine konservative Rechnung darstellt. Die Betrachtung war auf Basis der Daten des statistischen Bundesamtes deutschlandweit möglich. Die Untersuchung könnte durch eine weitere Aufsplittung der Anbauflächen und der Verknüpfung mit regionalen Klimadaten noch verbessert werden.

## Tabelle 69: Auswertung der Maßnahme „Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Bewässerung für Anbau von speziellen Anbausorten notwendig. Durch den Anbau im eigenen Land ist eine gewisse Unabhängigkeit gegeben, aber auch Importe möglich. |
| **Effektivität** | Niedrig | Die Effektivität ist sehr stark abhängig vom Wasserdargebot, so dass auch jährlich eine große Schwankung der realisierten Effekte möglich ist. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Die Maßnahme wird durch private Akteure durchgeführt. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Maßnahme festigt bestehende Strukturen, wie Bewirtschaftungsmethode, Sortenwahl, und ist in dem Sinne eine End-of-Pipe-Methode und fördert nicht eine integrative Herangehensweise. |
| **Reichweite** | Lokal | Die Bewässerungsanlagen haben einen lokalen Effekt für die mit Anlagen ausgestatteten Anbauflächen. |
| **Akzeptanz** | Niedrig/Mittel | Durch die starke Nutzung der Wasserressourcen ist ein Ausbau von Bewässerungssystemen durchaus umstritten. |
| **Regret/No-regret** | High-regret | Die Maßnahme erschwert das Erreichen anderer Ziele, wie ein nachhaltiger Umgang mit Wasserressourcen. |
| **Szenario-Variabilität** | Reduzierte Wirkung | Bei weniger Trockenheitsperioden ist die Wirkung reduziert. Bei starker Zunahme der Trockenheit ist Wasserdargebot evtl. nicht gegeben und Anlage kann nicht eingesetzt werden. |

## 3.10.2 Anpassungsmaßnahme „Einsatz angepasster Pflanzensorten“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Wie bereits bei der Anpassungsmaßnahme „Bewässerung“ beschrieben, sinkt die Regenmenge in Deutschland in den Sommermonaten bis 2071-2100 im Mittel um 21 % gegenüber 1961-1990 (vgl. Regionaler Klimaatlas Deutschland 2011). Ebenfalls nehmen Extremwettereignisse wie extreme Niederschläge und Stürme zu. Besonders von der Trockenheit sind nach De Groot (2006) Sommergemüse, Salat, Obst inkl. Baumobst und Blumen betroffen. Ein Anbau dieser Sorten lohnt sich nur noch, wenn weitere Maßnahmen ergriffen werden (vgl. De Groot 2006). Eine Option, um den Anbau dieser Sorten in Deutschland zu ermöglichen, ist die Bewässerung der Anbauflächen. Da diese Maßnahme aber zu Konflikten bei der Wasserentnahme gerade in Trockenzeiten führen kann, empfiehlt sich als Alternative der Umstieg auf andere Pflanzensorten. Dabei stehen tiefwurzelnde und hitzeresistente Sorten im Vordergrund, die bei anhaltenden Trockenperioden ohne zusätzliche Bewässerung auskommen. Um die Folgen von Extremwettereignissen abzuschwächen, können resistentere Pflanzensorten eingesetzt werden, die z.B. andere Eigenschaften aufweist (z.B. kräftigere Stängel).

Der Anbau von resilienten Pflanzensorten stellt eine zentrale Anpassungsmaßnahme in der Landwirtschaft dar (vgl. van Ierland 2007). Im Prinzip setzen landwirtschaftlichen Betriebe diese Maßnahme selbständig um und finanzieren diese auch. Als weitere Akteure können landwirtschaftliche Verbände und Behörden flankierend unterstützen, etwa durch Beratung und Bereitstellung von Informationen. Allerdings wird die Wahl der Anbausorten in Deutschland zu einem Großteil durch die Struktur der EU-Agrarsubventionen determiniert, so dass dieses Instrument, wenn auch indirekt, große Bedeutung für die Anpassung durch veränderte Anbausorten hat.

Abgesehen von Subventionen hat die öffentliche Hand am ehesten eine Rolle in der Erforschung und Züchtung von Pflanzenarten, die eine größere Resistenz gegen Hitze und Trockenheit aufweisen. Die Klimaänderungen werden mittel- bis langfristig erwartet, so dass ausreichend Zeit für die Umstellung besteht. Dagegen können die angebauten Pflanzensorten in der Regel kurzfristig umgestellt werden (mit Ausnahme mehrjähriger Anbaufrüchte, wie bspw. Baumobst), so dass die Maßnahme kurzfristig zum Einsatz kommen kann.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Es liegen bereits Forschungsprojekte vor, die geeignete Pflanzen für diverse Anbaugebiete untersucht haben. Ein Projekt wird im Rahmen des KlimZug-Projekts INKA BB in Zusammenarbeit mit Pflanzenzüchtern für Brandenburg durchgeführt. Das Projekt betrachtet natürliche Gegebenheiten, wie Wasserverfügbarkeit, und kombiniert diese mit Leistungsparametern der Pflanzen, z.B. Trockenheitstoleranz. In einem weiteren Teilprojekt werden Sortenkataloge für Gehölze und Gemüsekulturen unter Berücksichtigung der Faktoren Wasserbedarf, Qualität und Anfälligkeit gegenüber Schaderregern aufbereitet. Für dieses Projekt „Anpassung von gärtnerischen Kulturen an den Klimawandel“ beträgt die

Budgetsumme 600.000 Euro über 5 Jahre (Ulrichs 2011). Da uns für das zweite Projekt keine Daten vorliegen, nehmen wir an, dieses hat den gleichen Umfang, so dass das Budget für beide Projekte 1,2 Mio. Euro über 5 Jahre betragen würde. Dies bedeutet 240.000 Euro pro Jahr. Neben der staatlichen Förderung findet in erheblichem Umfang auch privat finanzierte Forschung statt, bspw. durch Saatguthersteller. Dieser Anteil kann hier nicht quantifiziert werden.

Die Entwicklung neuer, an das veränderte Klima angepasster Sorten zielt darauf ab, dass trotz Anpassung die Erträge stabil bleiben. Allerdings wird sich ein Rückgang der Erträge wohl nicht immer vermeiden lassen. Hinzu kommt, dass die Wahl der angebauten Sorten sich üblicherweise danach richtet, abhängig von den Gegebenheiten (Bodenbeschaffenheit, Klima etc.) den (ökonomischen) Ertrag zu maximieren. Werden zum Zweck der Anpassung die angebauten Sorten auf resistentere Sorten umgestellt, führt dies zu einem geringeren Ertrag gegenüber heutigen Erträgen. Dabei ist zu beachten, dass die Auswahl der angebauten Sorten zu einem erheblichen Teil von den Subventionen beeinflusst wird, die für bestimmte landwirtschaftliche Produkte bezahlt werden. Insgesamt wird hier ein um 10% geringerer Ernteertrag durch die Umstellung auf resistente Sorten angenommen.

De Groot (2006) schätzt, dass der Ertrag vorhandener Pflanzensorten ohne Anpassung durch steigende Trockenheit bei verschiedenen IPCC-Szenarien zwischen 22% und 37% sinken würde. Was die Schäden durch Extremwettereignisse angeht, kann auf Zahlen zu Ernteausfällen bei bereits aufgetretenen Schadensereignissen zurückgegriffen werden. Die Schäden und Ernteausfälle eines Starkregens in den Niederlanden 1998 werden bspw. mit 600 Mio. Euro angegeben. Darüber hinaus unterstellt De Groot (2006) zur Bewertung des Ausfalls aufgrund eines Extremwetterereignisses Ernterückgänge an, wie sie beim Auftreten des Maiswurzelkäfers beobachtet wurden. Hier traten Ernteausfälle in der Höhe von 6,5 bis 13 % auf. Für die Berechnung des Schadens wurden ein durchschnittlicher Ertrag von 1.550 Euro/ha und eine betroffene Gesamtanbaufläche von Silomais in Höhe von 1.800.000 ha (Statistisches Bundesamt 2010) angenommen. Wenn davon ausgegangen wird, dass ein solches Ereignis zum Ende des Jahrhunderts jährlich auftritt, entsteht ein Schaden von 165 bis 330 Mio. Euro pro Jahr. Die Berechnung ist allerdings stark davon abhängig, wie sich die Marktpreise für landwirtschaftliche Erzeugnisse bis dahin entwickeln. Auch hat die Höhe des Ernteausfalls einen hohen Einfluss, hier wurde versucht dies in Form einer Bandbreite darzustellen. Es lässt sich allerdings nicht beziffern, welcher Anteil dieses Schadens sich durch angepasste (d.h. resistentere) Fruchtsorten vermeiden ließe.

Auch wenn Kosten und Nutzen nur grob geschätzt werden können und von zahlreichen Unsicherheiten abhängen, ist davon auszugehen dass die Nutzen der Maßnahme ihre Kosten übersteigen. Auf der Kostenseite bestehen Unsicherheiten insbesondere beim Fortschritt der landwirtschaftlichen Forschung zu Anbauprodukten, die gegenüber Hitze und Trockenheit resistenter sind. Sowohl die Kosten- als auch die Nutzenseite sind von Unsicherheiten bezüglich der Marktpreise für landwirtschaftliche Erzeugnisse betroffen.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Maßnahme zielt darauf ab, die Erträge in der Landwirtschaft zu sichern, und trägt damit auch zu einer sicheren Versorgung mit Nahrungsmitteln bei. Mit der Entwicklung neuer und angepasster Anbauprodukte kann jedoch nur ein Teil der erwarteten Schäden kompensiert werden: Die Folgen bspw. einer Dürre auf den Ertrag lassen sich nur zu einem Teil durch

trockenheitsresistente Anbauprodukte lindern. Grundsätzlich besteht bei der Entwicklung resistenter Sorten kein Bedarf an staatlicher Intervention, da es einen bestehenden Markt für solche Produkte gibt und private Akteure dies leisten können. Eine staatliche Förderung kann aber für Grundlagenforschung angezeigt sein: Da Forschungsergebnisse zumindest teilweise ein öffentliches Gut sind, besteht die Möglichkeit von spill-over-Effekten: Da wissenschaftliche Erkenntnisse geteilt werden, kommt der Nutzen der Forschung nicht ausschließlich denen zu Gute, die die Forschung durchgeführt bzw. finanziert haben. Dies begrenzt den Anreiz für private Forschung, und stellt einen Anlass für staatliche Förderung dar. Dies gilt insbesondere für die Grundlagenforschung; bei der Entwicklung von marktreifen Anbausorten treten diese spill-over-Effekte kaum auf.

Bei der Steuerung der angebauten Sorten gilt es zu beachten, dass diese gegenwärtig zu einem erheblichen Teil über die relative Höhe der EU-Agrarsubventionen für verschiedene Produkte gesteuert wird; insofern lässt sich auch ein Wechsel auf andere Sorten durch das Subventionsregime beeinflussen. Sofern dies geschieht, wären die Wirkungen EU-weit zu beobachten. Ähnliches gilt für die Forschungsförderung, die mindestens auf nationaler Ebene und z.T. noch darüber hinaus Wirkungen zeitigt. Die konkrete Umsetzung geschieht natürlich jeweils vor Ort, und richtet sich dabei in erster Linie nach den Gegebenheiten vor Ort (Bodenbeschaffenheit, Verfügbarkeit von Wasser, klimatische Bedingungen etc.). Die Akzeptanz der Maßnahme ist eher weniger problematisch, da durch die Maßnahme keine Belastungen für bestimmte Gruppen entstehen. Eine Ausnahme stellen die Entwicklung und der Anbau von gentechnisch veränderten Pflanzensorten dar, bei denen die Akzeptanz eindeutig nicht gegeben ist. Ein Teil der Verbrauchergruppen ist prinzipiell gegenüber neuen Sorten skeptisch und eine Unterscheidung zu gentechnisch veränderten Pflanzensorten könnte teilweise in der Wahrnehmung des Einzelnen auch problematisch sein. Weiterhin tritt dies besonders bei neuen, bei in Deutschland ungewohnten Pflanzensorten auf. Ein Großteil der Veränderungen findet aber durch Anpassung von bereits vorhandenen Pflanzensorten, z.B. eine Veränderung von Getreidesorten, statt. Insgesamt kann die Maßnahme als low-regret eingestuft werden, zumal ein Wechsel zurück zu den vorher angebauten Sorten in der Regel möglich ist.

Insgesamt gilt es auch zu beachten, dass der Klimawandel für die deutsche Landwirtschaft, zumal in der mittleren Frist, nicht nur negative Konsequenzen bringt. Höhere $CO_2$-Konzentrationen in der Luft befördern das Pflanzenwachstum, und die Erwärmung der Durchschnittstemperaturen kann dazu führen, dass sich die Wachstumsperiode verlängert und ggf. sogar eine zusätzliche Ernte pro Jahr möglich ist. Hinzu kommt, dass Anbaugebiete in anderen Teilen der Welt tendenziell früher und härter von den Folgen des Klimawandels betroffen sein dürften. Die entstehende Knappheit an Nahrungsmitteln schlägt sich in höheren Weltmarktpreisen nieder, die auch deutschen Erzeugern zu Gute kommen. Ungeachtet der moralischen Implikationen solcher Überlegungen gilt, dass die deutsche Landwirtschaft von einem moderaten Klimawandel auch profitieren kann, wogegen vor allem ein starker Klimawandel zu wachsenden Einbußen führt.

### Tabelle 70: Auswertung der Maßnahme „Einsatz von angepassten Pflanzensorten“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Der Anbau von angepassten Pflanzensorten sichert die Erwerbsgrundlage der Landwirte und trägt zur Sicherheit der Nahrungsversorgung bei (sofern diese als problematisch empfunden wird). |
| **Effektivität** | Mittel | Die Maßnahme kann nur einen Teil des erwarteten Schadens abwenden. |
| **Mitnahmeeffekte** | Mittel | Private Akteure werden sich auch autonom in diesem Bereich anpassen. Allerdings besteht die Gefahr, dass Investitionen in langfristige Forschungsvorhaben zu spät initiiert werden. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Nach Entwicklung der angepassten Pflanzensorten können diese langfristig und langanhaltend genutzt werden. Die Entwicklung der Pflanzensorten führen zu keinem Umdenken hinsichtlich der bestehenden Strukturen. |
| **Reichweite** | Lokal/international | Die Pflanzensorten weisen im Anbau eine Wirkung auf den jeweiligen Anbauflächen auf. Die Forschungsergebnisse sind national bzw. sogar international nutzbar. |
| **Akzeptanz** | Mittel | Die Akzeptanz bei den Landwirten steigt mit auftretenden Extremwettereignissen. Die Verbraucher müssen sich auf neue Sorten einstellen. |
| **Regret/No-regret** | Low-regret | Die Sorten erhöhen die Diversifizierung der Anbausorten und somit die biologische Vielfalt. Einschränkend können „alte“ Sorten verloren gehen. |
| **Szenario-Variabilität** | Reduzierte Wirkung/keine Wirkung | Bei extremen Wettereignissen hat diese Maßnahme Grenzen. Bei extremen Trockenperioden oder Hitzeereignissen werden ebenfalls Ertragsminderungen bis zum gesamten Ernteausfall auftreten. |

# 3.11 Handlungsfeld Energie

## 3.11.1 Anpassungsmaßnahme „Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwetterereignisse“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Die Energieversorgung zählt zu den kritischen Infrastrukturen einer Volkswirtschaft, da ein Ausfall schwerwiegende Folgen für das Funktionieren der Wirtschaft, die Versorgung der Bevölkerung und letztlich für die öffentliche Ordnung hätte. Ein Zusammenbruch der Energieversorgung würde das wirtschaftliche und öffentliche Leben weitgehend lahmlegen. Die öffentliche Aufgabe besteht hier auch in einer Daseinsvorsorge.

Stromnetze, und insbesondere Freileitungen, können potenziell durch extreme Wetterereignisse beeinträchtigt werden. Vor allem Stürme, aber auch starke Schneelasten, und Blitzeinschläge können die Netze gefährden. Laut Regionalem Klimaatlas Deutschland (2011) nehmen die Sturmtage zwischen 1,4 und 2,4 Tage pro Jahr bis 2071-2100 (vgl. 1961-1990) zu. Die zusätzlichen Sturmtage fallen fast vollständig in das Wintervierteljahr, wogegen die Sturmtage im Sommer eher leicht abnehmen. Im Winter wird ebenfalls ein starker Anstieg der Sturmintensitäten vorhergesagt, im Mittel um 6 % (2071-2100, ggü. 1961-1990, Bandbreite von +2% bis +12%) (vgl. Regionaler Klimaatlas Deutschland 2011). Auch für Gewitter mit Blitzen im Sommer wird ein häufigeres Auftreten prognostiziert. Die Aussagen sind für Extremwetterereignisse noch mit hohen Unsicherheiten behaftet, die DMG (2007) geht von hohen Unsicherheiten bei Stürmen und mittleren bei Gewittern aus.

Das „Münsterländer Schneechaos“ von 2005 zeigt, wie sich ein starkes Schneefallereignis kombiniert mit orkanartigen Böen auf die Stromnetze auswirken kann. Aufgrund der Schnee- und Eislast in Kombination mit starken Böen knickten im Münsterland 82 Strommasten ab. Hochspannungsleitungen rissen bzw. hingen so tief, dass sie den Verkehr behinderten und zu Unfällen führten. Von den resultierenden Stromausfällen waren bis zu 250.000 Menschen betroffen, die vielerorts bis zu drei Tagen, und in Einzelfällen bis zu sieben Tagen, anhielten. (Rechenbach 2007; Riegel 2008; Wagner & Laps 2005)

Um weitere ähnliche Ereignisse bei noch höheren winterlichen Sturmstärken zu verhindern, ist eine Anpassung der Stromleitungen und –masten notwendig (vgl. van Ierland 2007). Van Ierland (2007) nennt als Maßnahme neu entwickelte Strommasten, unter Verwendung anderer Materialien wie z.B. Plastik, die so höheren Sturmintensitäten standhalten können. Des Weiteren können Stromausfälle durch engmaschigere Stromnetze und die Einhaltung des n-1 Kriteriums vermindert werden (vgl. Ahmels 2009). Das n-1 Kriterium stellt sicher, dass es bei dem Ausfall einer Leitung oder eines Transformators zu keiner Stromunterbrechung kommt. Engmaschige Stromnetze weisen eine größere Resilienz auf: Durch die engere Vermaschung gibt es jeweils Alternativen für die Durchleitung des Stroms. Der (witterungsbedingte) Ausfall einer einzelnen Leitung kann daher durch andere Teile des Netzes kompensiert werden. Ebenfalls von Vorteil sind dezentrale Versorgungsstrukturen, bei denen viele kleinere Stromhersteller an vielen Stellen Strom in das Netz einspeisen, und der Ausfall eines Erzeugers – oder einer Hauptleitung vom Erzeuger ins Netz – leichter zu verkraften ist.

Ein engermaschiges Netz weist eine höhere Resilienz auf. Durch die teils redundante Auslegung, bei der nicht alle Leitungen zu jedem Zeitpunkt voll genutzt werden, ist das System allerdings auch mit höheren Kosten verbunden. Die Zusatzkosten werden zunächst von den Netzbetreibern getragen, und von diesen in Form höherer Strompreise an die Kunden weitergegeben. Dabei gilt es natürlich zu beachten, dass die deutschen Stromnetze (Durchleitung und Verteilung) ohnehin vor einem umfangreichen Umbau stehen, um den veränderten Strukturen auf der Erzeugerseite und deren räumlicher Verteilung Rechnung zu tragen (wachsender Anteil erneuerbarer Energien, geringerer Anteil bei Kohle, Ausstieg aus der Kernenergie). Ein Zeithorizont für diesen Umbau ist nicht abzusehen.

Ein Ansatzpunkt für die Anpassung der Stromnetze an höhere Schneelasten könnte die Verschärfung der DIN-Norm DIN EN 50341-3-4 (2002) sein, welche die Schnee- und Eislast für Freileitungen regelt. Die Maßnahme ist bald anzustoßen, da die Lebensdauer von Freileitungen 80-100 Jahren beträgt und so für die Umsetzung eine lange Zeitspanne nötig ist (vgl. Vattenfall Europe AG 2005). Allerdings ist auch zu diskutieren, inwieweit Schnee- und Eislasten bis Ende des 21. Jahrhunderts in Deutschland noch problematisch regional zu- oder abnehmen werden. Größere Auswirkungen sind voraussichtlich durch Stürme und höhere Temperaturen zu erwarten.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Das deutsche Höchstspannungsnetz umfasst 35.700 km und besteht nahezu vollständig aus Freileitungen. Daneben bestehen in Deutschland Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze. In der weiteren Untersuchung stehen die Höchstspannungsnetze im Zentrum, da sie die überregionalen Stromfernleitungen darstellen. Sie verbinden die Netze regionaler Stromversorger und bedienen sehr große Industriebetriebe. Ebenfalls verknüpfen sie das deutsche Stromnetz mit ausländischen Netzen (vgl. BDEW 2010a).

Die Vattenfall Europe AG (2005) schätzt die Investitionskosten bei neuen Freileitungen im Höchstspannungsnetz (380/220 kV) auf 0,7 bis 0,9 Mio. Euro/km. Die Lebensdauer der Leitungsnetze beträgt 80 bis 100 Jahre. Van Ierland (2007) gibt die Investitionskosten für innovative klimaangepasste Stromleitungen und -masten mit ca. 2 Mio. Euro/km an. Die Differenz von 1,1 bis 1,3 Mio. Euro/km wird für die weitere Berechnung als Anpassungszuschlag verwendet. Eine Anpassung der baulichen Bestandteile der Stromnetze auf Extremwettereignisse sollte in den normalen Modernisierungs- und Reinvestitionszyklus integriert erfolgen, zum einen um die Kosten zu senken, zum andern im Licht der Tatsache, dass die Netze in Deutschland ohnehin vor einem grundlegenden Umbau stehen. Neben der Ertüchtigung in der Fläche können zudem windexponierte Lagen besonders geschützt bzw. Investitionen in diesen Lagen vorgezogen werden. Der regionale Klimaatlas Deutschland (2011) zeigt, dass die höchste Zunahme der Windintensitäten in der Nordhälfte Deutschlands erwartet wird. Wenn angenommen wird, dass bis 2050 das gesamte deutsche Höchstspannungsnetz modernisiert wird und in der zweiten Hälfte des Jahrtausends ein zweiter Investitionszyklus ansteht, entstehen bis 2100 Kosten in Höhe von 80-93 Mrd. Euro. Umgerechnet auf eine Dauer von 90 Jahren betragen die zusätzlichen Kosten 0,9 – 1,0 Mrd. Euro/Jahr. Die Kosten hierfür werden zunächst vollständig von den Netzbetreibern getragen, die diese wiederum an die Stromkunden weitergeben.

**Tabelle 71: Kostenberechnung für Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwettereignisse**

| | |
|---|---|
| Höchstspannungsnetz in Deutschland | 35.700 km |
| zusätzliche Kosten für klimaangepasste Stromnetze und -masten | 1,1-1,3 Mio. Euro/km |
| Kosten für einmaligen Investitionszyklus, deutschlandweit | 40 - 46,5 Mrd. Euro |
| Kosten bis 2100 (zweimaliger Investitionszyklus) | 80 - 93 Mrd. Euro |
| **Kosten pro Jahr (2011-2100)** | **0,9 - 1,0 Mrd. Euro** |

Der Aufbau eines engmaschigen Netzes fällt zusammen mit dem ohnehin anstehenden Umbau und Ausbau des Stromnetzes, um geänderte Erzeugungsstrukturen (und insb. der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien) Rechnung zu tragen. Der tatsächliche Ausbaubedarf ist umstritten; unterschiedliche Studien kommen hier zu unterschiedlichen Ergebnissen. Den höchsten Ausbaubedarf stellt die zweite Netzstudie der Deutschen Energieagentur (Dena) fest, wonach bis 2020 weitere 1.700 bis 3.500 Kilometer je nach Lösungsansatz an Stromleitungen nötig sind. Dafür müssten bis 2020 ca. 1 bis 1,6 Mrd. Euro pro Jahr investiert werden (vgl. Dena 2010). Da diese Kosten ohnehin für den Umbau des Energiesystems anfallen, werden sie nicht der Anpassung an den Klimawandel zugeschlagen.

Der Nutzen lässt sich anhand der Schadenskosten aus dem Münsterländer Stromausfall 2005, bei dem mehrere Hochspannungstrassen zerstört wurden, grob schätzen. Die IHK Nord Westfalen (2006) nimmt für den zeitweiligen Stromausfall mit 250.000 betroffenen Menschen und einer Zahl von Handwerks- und Industriebetrieben einen volkswirtschaftlichen Schaden von 50-100 Mio. Euro an. Anhand der zunehmenden Intensität und Häufigkeit der Stürme, wird angenommen, dass ein vergleichbarer Schaden zwei- bis viermal pro Jahrzehnt entstünde, entsprechend durchschnittlich 10-40 Mio. Euro pro Jahr. Anbetracht der Tatsache, dass der Stromausfall eine ländliche Gegend getroffen hat, ist dies eher eine konservative Schätzung.

Ein weiteres Schadensszenario basiert auf dem Ausfall von Höchstspannungsleitungen. Große Stromausfälle aufgrund des Ausfalls von Höchstspannungsleitungen sind u.a. der Stromausfall 2003 in Nordamerika (USA und Kanada) oder der Vorfall 2003 in Italien. Der Stromausfall in Italien betraf ca. 57 Millionen Personen und es dauerte bis zu 24 Stunden bevor alle Abnehmer wieder am Netz waren. Der Schaden wird auf ca. 400 - 500 Millionen Euro geschätzt (Verivox 2003, News.at 2003). Dieser Schaden mit Hilfe des BIPs umgerechnet auf Deutschland ergibt ca. 700 - 900 Mio. Euro. Der Stromausfall 2003 im Osten der USA und Kanada betraf ca. 50 Mio. Menschen und führte zu ökonomischen Schäden von 6,8 bis 10,3 Mrd. US$ (Frontier Economics 2008). Frontier Economics (2008) haben das Ereignis in den USA und Kanada auf Größenordnungen in Deutschland umgerechnet und kommen dabei auf Schäden in Höhe von 1,1 bis 2,2 Mrd. Euro pro Stromausfall. Für das Höchstspannungsnetz soll angenommen werden, dass Ende des 21. Jahrhunderts einmal pro Jahrzehnt ein entsprechendes Ereignis eintritt. Auf der Datenbasis von 700 bis 2.200 Mio. Euro pro Schadensfall ergeben sich Schäden in Höhe von 70-220 Mio. Euro pro Jahr.

## Beurteilung der Maßnahme

Die Stabilisierung der Stromnetze und ihr Schutz vor witterungsbedingten Ausfällen stellen einen wichtigen Baustein zum Schutz der kritischen Infrastrukturen einer Volkswirtschaft dar. Die Maßnahmen wirken sich direkt auf die Versorgung der Bevölkerung aus. Ein Mitnahmeeffekt ist nicht gegeben, sofern die Anpassung über eine Änderung der gesetzlichen Grundlage erfolgt – eine staatliche Förderung für die Ertüchtigung der Netze dagegen ist nicht erforderlich. Im Zusammenhang mit dem Aus- und Umbau der Netze zur Integration von wachsenden Mengen an Strom aus erneubaren Energien wird ohnehin über die zukünftige Ausgestaltung der Stromnetze diskutiert. Ein wichtiger Aspekt für die Akzeptanz des Netzausbaus vor Ort betrifft die Wahl zwischen Freileitungen und Erdkabeln. Beim Bau neuer Freileitungen sind Akzeptanzprobleme vor Ort zu befürchten, dementsprechend ist der Netzausbau auch ein parteipolitisch umstrittenes Thema (vgl. Schering 2009). Erdkabel erfordern anfangs ein höheres Investitionsvolumen (nach Expertenmeinung ca. das Fünffache von Freileitungen), sind aber in der Wartung kostengünstiger. Allerdings treten höhere Kosten im Fall von Schäden und für Inspektionen auf. Weiterhin haben beide Leitungsarten Auswirkungen auf Biodiversität. Bei Freileitungen wird über die Gefährdung von Vögeln diskutiert. Erdkabel haben richten größere Schäden bei dem Bau an und können den Boden erwärmen, was zu veränderten Lebensbedingungen führt. Vor allem bei Trockenperioden kann der Wärmeeffekt zu einer stärkeren Austrocknung der Böden in diesen Abschnitten führen. Wie bereits dargestellt, ist der Aus- und Umbau der Netze für den Ausbau der erneuerbaren Energien ohnehin notwendig, und die Stabilisierung des Netzes mit weiteren Netz-km stellt damit prinzipiell eine no-regret-Maßnahme dar. Der Aufpreis für angepasste Infrastrukturen, wie Masten und Leitungen, gelten als no-regret, sowohl bei bestehenden als auch bei neuen Stromleitungen und –masten. Da die Lebensdauer der Netze aber hoch ist, muss die Maßnahme früh eingeleitet werden, wenn das Netz ertüchtigt sein soll, bis die befürchteten Ereignisse sich einstellen.

In der hier durchgeführten Kosten-Nutzen-Betrachtung fallen Kosten von 1 Mrd. Euro pro Jahr an für die Ertüchtigung der bestehenden Stromleitungen und –masten im Höchstspannungsnetz auf höhere Windstärken und andere Wetterextreme. Der Nutzen lässt sich wesentlich schwerer schätzen, da zwar eine Erhöhung von Sturmintensitäten vorhergesagt wird, aber unsicher ist, mit welcher Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit diese Effekte zu zusätzlichen Stromausfällen führen würden, wenn eine Ertüchtigung der Netze ausbleibt. Anhand der oben gemachten Annahmen läge der Nutzen lediglich bei 10-40 Mio. pro Jahr bei Störungen im Hochspannungsnetz und 70-220 Euro für das Höchstspannungsnetz, d.h. deutlich geringer als die Kosten der Maßnahme.

## Tabelle 72: Auswertung der Maßnahme „Auslegung des Stromleitungsnetzes für Extremwetterereignisse“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Schutz kritischer Infrastrukturen | Die Energieversorgung ist Teil der kritischen Infrastrukturen. |
| **Effektivität** | Hoch | Durch die stabilere Bauweise der Freileitungen und die Installation eines engmaschigeren Netzes kann ein großer Teil der Schäden vermieden werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Die Finanzierung wird voraussichtlich erfolgt komplett durch für private Akteure anfallen. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die Maßnahme wirkt vorübergehend, entsprechend ihrer der Lebensdauer der Infrastruktur. Der Ausbau des Stromleitungsnetzes wirkt sich positiv auf eine nachhaltige Energieversorgung aus. |
| **Reichweite** | Lokal/regional | Je nach der Betroffenheit durch die Schadensereignisse ist die Wirkung (die vermiedenen Stromausfälle) lokal bis regional. |
| **Akzeptanz** | Mittel | Durch den Netzausbau für die erneuerbaren Energieträger ist die Akzeptanz auf politischer Ebene gegeben. Allerdings treten einige politische Akteure für Erdkabel ein. In der Bevölkerung können Akzeptanzprobleme aufgrund von gesundheitlichen Auswirkungen und Naturschutzaspekten auftreten. |
| **Regret/No-regret** | regret | Die Stabilität des Stromnetzes physisch zu erhöhen ist eine regret-Maßnahme. Der Aus- und Umbau des Stromnetzes ist aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien ohnehin nötig und stellt somit aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien eine No-Regret-Maßnahme dar. |
| **Szenario-Variabilität** | Reduzierte Wirkung | Zu starke Ereignisse können zu Einschränkung führen. Bei weniger starken Stürmen wäre Ausbau nicht notwendig. |

## 3.11.2 Anpassungsmaßnahme „Kühlung von thermischen Kraftwerken“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Die projizierte höhere Anzahl von Hitzetagen und größere Trockenheit im Sommer (vgl. regionaler Klimaatlas Deutschland 2011) beeinflusst die Kühlwassersituation in thermischen Kraftwerken, d.h. Atom-, Kohle- und Erdgaskraftwerken, insbesondere bei der Mehrzahl der Anlagen, die ihr Kühlwasser aus Flüssen entnehmen. Dabei wirken sich Temperatur und Niederschlag sowohl auf die Gewässertemperaturen und den Wasserpegel aus. Je höher die Temperatur des entnommenen Kühlwassers ist, desto geringer ist die Kapazität des Wassers zur Kühlung. Des Weiteren muss für die Einleitung von Kühlwasser in die Gewässer eine Mindesttemperaturdifferenz zwischen dem Flusswasser und dem einzuleitenden Kühlwasser eingehalten werden. Je nach Genehmigung liegt der Grenzwert für das eingeleitete Kühlwasser zwischen maximal 25 und 28 °C Gewässertemperatur. Wird diese Temperatur überschritten, muss die Leistung des Kraftwerks gedrosselt werden.[49] Dies geschah im August 2003 bei mehreren Kraftwerken, z.B. mussten die Kernkraftwerke Philippsburg und Neckarwestheim für ca. eine Woche mit nur 80% ihrer Leistung gefahren werden (vgl. SFV 2003). Im Sommer 2011 wurde die genehmigte Temperatur für das zurückgeleitete Kühlwasser darüber hinaus teilweise bis auf 30 °C erhöht (SFV 2003). Der WWF (2009) sieht die Gefahr erheblicher Konsequenzen für die Tier- und Pflanzenwelt durch die hohen Gewässertemperaturen. Epidemien und Seuchen würden wahrscheinlicher, z.B. wird vermutet, dass niedrige Abflüsse und die hohe Flusstemperatur im Rhein ursächlich für das 2003 aufgetretene Aalsterben waren.

Auch im Sommer 2010 wurde u.a. das Kernkraftwerk Brokdorf wegen zu hoher Wassertemperatur der Elbe kurzzeitig gedrosselt (BZ 2010). Nach Angaben des WWF (2009) fuhren die Kraftwerksbetreiber auch 2006 und 2007 die Leistung einzelner Kraftwerke zeitweilig herunter, da andernfalls eine Überschreitung der zulässigen Grenzwerte für das Kühlwasser drohte.

Diese Problematik wird als eine der bedeutendsten Herausforderungen angesehen, der der Energiebereich durch den Klimawandel gegenübersteht, so z.B. vom Kompass Stakeholder-Dialog im Juni 2009. Um einen stabile Versorgung mit Kühlwasser zu erreichen, wird in vielen Publikationen, u.a. van Ierland (2007), der Bau von Kühltürmen vorgeschlagen. Um die gleiche Kühlleistung zu erreichen, sind jedoch große Kühltürme notwendig, so dass diese bei Großkraftwerken bislang wenig eingesetzt werden. Als Alternative zu Kühltürmen wird diskutiert, ob Technologien wie solare Kühlung, Kühlung auf Basis von Adsorptionskälte, oder auch Trockenkühlung zum Einsatz kommen könnten (Dunkelberg et al. 2009). Diese Technologien sind jedoch bislang nicht im großtechnischen Maßstab einsetzbar. Indem die Maßnahme den Verbrauch an Kühlwasser senkt, unterstützt sie auch eine insgesamt

[49] Zudem spielt hier auch der Wasserpegel eine Rolle: ein niedriger Wasserstand begrenzt zusätzlich das Potenzial von Flüssen, eingeleitetes Kühlwasser aufzunehmen, da das Kühlwasser auf eine geringere Menge an Flusswasser trifft und dadurch eine stärkere Erwärmung des Flusswassers verursacht.

geringe Wassernutzung und unterstützt damit Maßnahmen im Handlungsfeld Wasserwirtschaft.

Die Kraftwerksbetreiber setzen die Maßnahme vollständig selbst um. Die Kühlwasserproblematik – und die mögliche zukünftige Verschärfung aufgrund des Klimawandels wird bereits bei Neubauten von Kraftwerken mit in die Planung einbezogen. Für innovative energie- und wassersparende Konzepte, wie die solare Kühlung, könnten weitere staatliche Förderungen hilfreich sein, bis diese Technologien marktreif sind. Die Maßnahme wirkt unmittelbar nach Installation der neuen Kühltechnologie, also bspw. nach Bau des Kühlturms.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Für die Kosten- und Nutzenbetrachtung unterstellen wir bei der Abschätzung, dass alle Großkraftwerke in Deutschland mit Kühltürmen ausgestattet werden, um eine von der Gewässertemperatur und Trockenheit unabhängige sichere Energieversorgung zu gewährleisten.

Van Ierland (2007) gibt die Kosten für den Bau eines Kühlturms mit 55 Mio. Euro an. Es geht dabei nicht hervor, ob die Summe reine Investitionskosten für den Bau umfasst oder ebenfalls Betriebs- bzw. Instandhaltungskosten in der Summe enthalten sind.

Die Betroffenheit wird sich durch den Umbau der Energieerzeugung in Deutschland tendenziell verbessern. Mit der geplanten Umstellung der Stromerzeugung in Deutschland auf erneuerbare Energien und dem Ausstieg aus der Kernenergie werden mit den Kernkraftwerken insgesamt 17 thermische Kraftwerke stillgelegt. Nach dem geplanten Referenzszenarios des Umweltbundesamtes soll 2050 die Stromerzeugung zu 100% auf erneuerbaren Energieträgern basieren.

Um bis 2050 die Energieversorgung zu sichern, ist jedoch bei einigen Kraftwerken die Nachrüstung mit Kühltürmen oder anderen Kühltechnologien nötig. Da seit den 1970er Jahren jedes Kraftwerk mit einem Kühlturm ausgestattet werden muss, wird angenommen, dass dies 3-5 Kraftwerke betrifft. Die Kosten für eine Ausrüstung von 3-5 Kraftwerken mit Kühltürmen würden bei 165-275 Mio. Euro liegen. Die Lebensdauer von thermischen Kraftwerken liegt bei ca. 40 Jahren. Es wird angenommen, dass die zugehörigen Kühltürme ebenfalls diese Lebensdauer aufweisen. Die Kosten betragen damit 4 – 8 Mio. Euro pro Jahr für 3-5 Kraftwerke.

Zur Bewertung der drohenden Minderproduktion wegen des Klimawandels wird der Preisanstieg von 0,50 ct/kWh auf 1,79 ct/kWh im August 2003 an der Amsterdamer Börse herangezogen, also eine Verteuerung um 1,29 ct/kWh (vgl. BOXER – Infodienst (2003)). Die Drosselung der Kraftwerke war laut verschiedenen Pressemeldungen (vgl. SFV 2003) für ca. eine Woche nötig (11.-18. August 2003). Für das Jahr 2008 beträgt der durchschnittliche Stromverbrauch pro Woche deutschlandweit 10 Mrd. kWh (vgl. BdEW 2010b), wobei nicht berücksichtigt ist, dass der Verbrauch u.a. aufgrund des Bedarfs an Kühlung im Hochsommer tendenziell höher liegt. Wenn angenommen wird, das 10% der Energiemenge auf day-to-day-Basis gehandelt wird, und die Preisschwankungen am Spotmarkt daher zu 10% in den Strompreis eingehen, ergeben sich aus einer Verteuerung von 1 - 1,5 ct/kWh am Spotmarkt eine Preiserhöhung für Stromkunden von 10 bis 15 Mio. Euro. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Preisentwicklung einzig durch die Drosselung der

Kraftwerke für eine Woche verursacht wird, und keine anderen Entwicklungen in der gleichen Zeit einen Einfluss auf den Preis hatten. Zwischen 2000 und 2010 wurden einzelne Kraftwerke bereits viermal kurzzeitig heruntergefahren. Bis 2100 (vgl. zu 1961-1990) werden im Mittel 16 Hitzetage mehr pro Jahr auftreten. Huebler & Klepper (2003) gehen von derzeit im Durchschnitt 10 Hitzetagen pro Jahr aus. Darüber hinaus steigen die Extremwerte der Temperaturen in Deutschland absolut. Daher wird davon ausgegangen, dass die Situation, wie sie im Sommer 2003 erreicht wurde, bis zum Jahr 2100 durchschnittlich in jedem Jahr entsteht. So wird angenommen, dass der Nutzen 10 bis 15 Mio. Euro pro Jahr nur durch die vermiedene Preissteigerung entsteht.

Neben erhöhten Strompreisen kann eine Drosselung und Abschaltung von Kraftwerken im Extremfall auch zu Engpässen bei der Stromversorgung führen. Da die Schäden eines Stromausfalls, insbesondere die entgangene Wertschöpfung, je nach betroffenem Gebiet und Dauer des Stromausfalls sehr unterschiedlich sein kann, wird dies hier nicht weiter quantifiziert.

Wie bereits angesprochen, können Ausnahmeregelungen für die Temperatur des einzuleitenden Kühlwassers starke Folgen für die Lebewesen und die biologische Vielfalt der Flüsse haben. WWF (2009) geht davon aus, dass es häufiger zu Fischsterben kommen kann und insbesondere für kaltwasserliebende Arten wie Forellen Probleme entstehen können. So nimmt z.B. die Sterblichkeit von Forellen ab einer Wassertemperatur von 23-24 °C deutlich zu.

### Beurteilung der Maßnahme

Der Ausbau von alternativen Formen der Kühlung (insb. Kühltürmen) bei thermischen Kraftwerken stellt eine wichtige Maßnahme dar, um die Sicherheit der Energieversorgung als kritischer Infrastruktur zu gewährleisten. Das größte Problem für die Kühlung von thermischen Kraftwerken entsteht aus der Kombination aus hohen Gewässertemperaturen und Trockenheit, und den damit verbundenen niedrigen Abflüssen. Alternative Formen der Kühlung sind ein effizientes Instrument, um der Kühlwasserproblematik zu begegnen. Mitnahmeeffekte treten nicht auf, da die Investitionen allein durch die Betreiber bzw. Eigner der Kraftwerke getragen werden. Durch die langen Investitionszyklen im Bereich des Kraftwerksbaus ist aber die Kühlwasserproblematik bereits heute bei Planung und Bau neuer thermischer Kraftwerke zu integrieren. Die Akzeptanz der Maßnahme erscheint zunächst recht unproblematisch, zumal die Bevölkerung durch eine sichere Energieversorgung profitiert. Allenfalls bei direkten Anwohnern, die in der Nähe der Kraftwerke leben, könnte sich Widerstand festmachen an der visuellen Beeinträchtigung durch die Kühltürme selbst und an der Wolkenbildung aus Kondenswasser. Der Bau von Kraftwerken bzw. die Integration von Kühltechnologie ist eine regret-Maßnahme, zumal der erwartete Nutzen sich nur dann einstellt, wenn es tatsächlich zum vorhergesagten Temperaturanstieg kommt.

Die Kosten werden auf Basis von Investitionskosten berechnet. Die Anzahl der auszustattenden Anlagen wird anhand der Zahl der betroffenen Anlagen in Jahren mit heißen Sommern geschätzt. Darüber hinaus können Investitionen für weitere Kraftwerke mit Durchlaufkühlung nötig werden. Der Nutzen der Maßnahme wurde anhand der erhöhten Strompreise im Sommer 2003 geschätzt. Da dies ein Einzelereignis darstellt, sind diese Daten mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Darüber hinaus wurden bestimmte

Nutzenkomponenten nicht quantifiziert, wie eine verringerte Wahrscheinlichkeit von Fischsterben.

### Tabelle 73: Auswertung der Maßnahme „Kühlung von thermischen Kraftwerken“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Schutz kritischer Infrastrukturen | Die Energieversorgung ist eine der kritischen Infrastrukturen. |
| **Effektivität** | Hoch | Der Aufbau eines geschlossenen Kühlsystems kann der Kühlwasserproblematik sehr gut entgegen wirken. |
| **Mitnahmeeffekte** | Gering | Die Finanzierung wird voraussichtlich über private Akteure abgewickelt. Bei Förder- oder Forschungsprogramme für innovative technische Lösungen kann ein geringer Mitnahmeeffekt nicht ausgeschlossen werden. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Die Maßnahme ist eine reine technische Anpassung im heutigen Kraftwerksbestand. Sie löst keine dynamischen Prozesse im Sinne einer nachhaltigen Energieversorgung aus. |
| **Reichweite** | Lokal/regional | Die Maßnahme wirkt für das vom jeweiligen Kraftwerk belieferte Gebiet. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Durch die bereits auftretenden Probleme bei heißen Sommern liegt eine hohe Akzeptanz vor. Probleme können bei Anwohnern in geringer Entfernung zum thermischen Kraftwerk auftreten. |
| **Regret/No-regret** | regret | Die Maßnahme ist nur notwendig, wenn höhere Temperaturen bei extremen Hitzeereignissen auftreten. Allerdings wäre ein Nutzen bereits bei mehreren Sommern in den letzten Jahren eingetreten. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja (hoch) | Eine Szenario-Variabilität liegt nur in sehr hohem Ausmaß vor, da bereits heute ein Einbau sinnvoll ist. |

# 3.12 Handlungsfeld Tourismus

## 3.12.1 Anpassungsmaßnahme „Erhaltung der derzeitigen Tourismusangebote über Präparierung der Pisten“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Durch die vorhergesagten höheren Durchschnittstemperaturen verringert sich der Schneefall in Deutschland deutlich. Laut Regionalem Klimaatlas Deutschland (2011) soll die Schneemenge im Zeitraum 2071-2100 zwischen 58 und 94 % gegenüber 1961-1990 zurückgehen (mittlere Änderung bei 81%). Als Konsequenz geht Agrawala (2007) davon aus, dass bei einem durchschnittlichen Anstieg der globalen Temperatur um 4°C nur noch eines der untersuchten 39 Skigebiete in den deutschen Alpen als schneesicher gilt. Bei einer 2°C höheren globalen Durchschnittstemperaturen gelten bereits über 80% der untersuchten deutschen Skigebiete als nicht mehr schneesicher. Agrawala (2007) stützt sich dabei auf die Definition der „100-Tage-Regel“, d.h. wenn ein Skigebiet in mindestens 7 von 10 Jahren mindestens 100 Tage mehr als eine Schneehöhe 30 cm aufweist, gilt es als schneesicher.

Um dem Problem zu begegnen, liegen zwei Arten von Anpassungsmaßnahmen mit unterschiedlichen Integrationsgraden vor. Mit der ersten Gruppe von Maßnahmen kann die momentane Nutzung der Region aufrecht erhalten werden und so mindestens für eine Übergangszeit klassischer Wintersporttourismus weiter betrieben werden. Dazu gehört z.B. die Verlegung von Pisten in höhere Gebiete oder die Beschneiung von Skipisten. Die zweite Maßnahmengruppe umfasst Maßnahmen, die einer strategischen Umorientierung von Regionen hin zu neuen touristischen Konzepten dient. Dafür können neue Angebote im Winter verstärkt werden (wie z.B. Wellness), oder der Alljahrestourismus ausgebaut werden, z.B. mit einem besseren Wanderwegenetz oder stärkerer Vermarktung der Region für die Sommerreisezeit. Da eine neue Vermarktungsstrategie und parallele Investitionen in die Strukturen des Sommertourismus eine mittelfristige Maßnahme sind, behandelt dieser Bericht aus beiden Gruppen jeweils eine Anpassungsmaßnahme (siehe ebenfalls folgendes Kapitel zu Alljahrestourismus).

Um die wirtschaftliche Basis für eine Übergangszeit bis zum Wirken von strukturellen Veränderungen zu sichern, werden in deutschen Wintersportgebieten bereits verschiedene Aktivitäten unternommen. Die Maßnahmen umfassen u.a. die Beschneiung, eine schneeschonende Pistenpräparierung und der Schutz des Schnees durch Verschattung. Die Beschneiung ist die zentrale Maßnahme in diesem Bereich und wird für die folgende Betrachtung ausgewählt.

Die Maßnahme ist eine objektorientierte Maßnahme, die direkt zur Verbesserung der Schneesituation führt und damit bei Wintersportlern bereits bei der Wahl einer Ferienregion einfließt. Beschneiung ist eine Maßnahme, die vermehrt in Deutschland und auch anderen Alpenländern eingesetzt wird. Für die Kosten kommen meist die Pistenbetreiber auf, die sich damit die Umsätze für bereits getätigte Investitionen sichern. Die gesamte Wintertourismusbranche, wie das Gastronomiegewerbe und die Hotellerie, profitieren allerdings direkt. Folgeeffekte zeichnen sich weiterhin für die gesamte Region, z.B. das Handwerk ab. Die Pistenbetreiber fordern deshalb, dass sich auch andere Akteure an den

Investitionen und Mehrkosten für Beschneiung beteiligen sollten (vgl. Kröll 2000). Die Kommunen müssen die Installation von Beschneiungsanlagen genehmigen. Die Maßnahme sollte kurzfristig umgesetzt werden, gerade wenn angenommen wird, dass dies nur eine Übergangslösung ist. Die Anlagen zur Beschneiung können direkt nach der Installation eingesetzt werden und zeigen eine kurzfristige Wirkung. Neben der technischen Umsetzung muss allerdings auch an die Kunden kommuniziert werden, dass die Anlage jetzt vorliegt und die Schneesituation sicherer ist.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf das Bundesland Bayern. Bayern beherbergt mit den Alpen einen Großteil des deutschen Wintersporttourismus.

Berechnungen von CIPRA ergeben Investitionskosten in Höhe von 136.000 Euro pro ha für die Installation von Beschneiungsanlagen (vgl. Hahn 2004). Gemäß Mathis u.a. (2003) liegt die bisher investierte Summe für Beschneiungsanlagen in der Schweiz bei 143.000 Euro pro ha. Daraus abgeleitet, geht in die folgende Untersuchung der Wert von 140.000 Euro pro ha für jede neu zu beschneiende Fläche für die Installation der Anlage ein. Darüber hinaus liegen die Kosten für den Unterhalt zwischen 3 und 5 Euro/$m^3$ Kunstschnee (inkl. Energie-, Personalkosten, Abschreibungen) (vgl. Hahn 2004) bzw. bei 24.000 – 40.000 Euro pro km Skipiste pro Jahr (vgl. Elsasser und Messerli (2001).

Im Winter 2010/2011 wurden in Bayern 630 ha Pistenfläche beschneit. Dies entspricht 17% der Gesamtpistenfläche von 3.700 ha. Die meisten Anlagen befinden sich in Oberbayern und im Allgäu.

**Tabelle 74: Beschneite Fläche**

| Angaben 2010/11 | Bayern | Österreich | Schweiz | Frankreich |
|---|---|---|---|---|
| Pistenfläche | 3 700 ha | 25 400 ha | 22 000 ha | 26 500 ha |
| beschneit | 630 ha | 16 750 ha | 7 260 ha | 5 300 ha |
| in % | 17 % | 66 % | 33 % | 20 % |

*Quelle: Verband Deutscher Seilbahnen (2011)*

Um das Wintersportangebot weiter zu sichern, wird eine Erhöhung der beschneiten Fläche auf 50% angenommen. Der Anteil liegt damit noch deutlich unter dem Anteil in Österreich (vgl. Tabelle 74). Der Zubau liegt bei 1.220 ha.

Mit den oben angegebenen Investitionskosten von 140.000 Euro/ha ergeben sich für die Pistenfläche von 1.220 ha Kosten in Höhe von 170 Mio. Euro.

Die zweite Kostenkomponente sind die Unterhaltskosten. Für die Grundbeschneiung zu Beginn des Winters wird eine Höhe von 30 cm benötigt, so dass 1 ha Skipiste 3.000 $m^3$ benötigt (vgl. Bayrisches Landesamt für Umwelt 2009). Für 1.220 ha ergeben sich 3,66 Mio. $m^3$ Schnee für die Grundbeschneiung. Wenn die Unterhaltskosten von 3-5 Euro pro $m^3$ produziertem Schnee ergibt dies 11 - 18,3 Mio. Euro pro Jahr (zu Beginn der Saison).

Für die Nachbeschneiung fallen nochmals 1.000-2.000 $m^3$ Schnee pro ha an (vgl. Bayrisches Landesamt für Umwelt 2009). Für 1.220 ha bedeutet dies 1,22 bis 2,44 Mio $m^3$. Bei 3-5 Euro/ $m^3$ entstehen 3,66 – 12,2 Mio. Euro pro Jahr (während der Saison).

**Tabelle 75: Unterhaltungskosten der beschneiten Fläche**

| | Grundbeschneiung | Nachbeschneiung | Gesamt pro Jahr |
|---|---|---|---|
| Schneemenge pro ha/a | 3.000 $m^3$/a | 1.000 - 2.000 $m^3$/a | 4.000 – 5.000 $m^3$/a |
| Schneemenge für zusätzliche Fläche von 1.220 ha/a | 3,66 Mio. $m^3$/a | 1,22 - 2,44 Mio. $m^3$/a | 4,88 – 6,10 Mio. $m^3$/a |
| Unterhaltskosten pro Jahr (3-5 Euro/$m^3$) | **11 – 18,3 Mio. €/a** | **3,66 – 12,2 Mio. €/a** | **14,7 - 30,5 Mio €/a** |

Als Nutzen wird der Anteil des BIP für den Wintertourismus verwendet. Da das Bruttoinlandsprodukt auf Kreisebene nicht für verschiedene Wirtschaftssektoren aufgegliedert vorliegt, wurde das BIP bestimmter Landkreise in Oberbayern und Schwaben verwendet, die vor allem touristisch geprägt sind (siehe Tabelle 76).

**Tabelle 76: Landkreise in Bayern mit ausgeprägtem Wintertourismus**

| Landkreise | BIP (2008, in Mio. Euro) |
|---|---|
| Berchtesgadener Land (Lkr) | 2.786,226 |
| Bad Tölz-Wolfratshausen (Lkr) | 3.335,439 |
| Garmisch-Partenkirchen (Lkr) | 2.116,163 |
| Miesbach (Lkr) | 2.830,184 |
| Rosenheim (Lkr) | 6.865,981 |
| Traunstein (Lkr) | 5.201,588 |
| Ostallgäu (Lkr) | 3.720,598 |
| Unterallgäu (Lkr) | 3.546,538 |
| Oberallgäu (Lkr) | 3.797,223 |
| **Summe** | **34.199,940** |

*Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2011*

In der Literatur wird diskutiert, dass einzelne Gemeinden bis zu 80%-100% ihrer Bruttowertschöpfung über den Tourismus erwirtschaften. Die Anzahl der Gäste im Wintertourismus liegen zwar deutlich unter der Anzahl der Sommergäste, aber im Winter geben die Touristen mehr Geld aus. Teich u.a. (2007) hat die regionale Wertschöpfung der Beschneiung für die Gemeinde Davos betrachtet. In Davos liegt der Anteil der regionalen Wertschöpfung des Wintertourismus bei 26%. Teich u.a. (2007) nimmt aufgrund von Szenarioberechnungen an, dass durch die Absicherung von schneearmen Wintern durch Beschneiungsanlagen ein Verlust von bis zu 10 % der regionalen Wertschöpfung verhindert werden kann. Für unseren Fall wird angenommen, dass ein Verlust von 5 bis 10% der regionalen Wertschöpfung vermieden werden könnte und sich damit ein vermiedener Schaden von 1,7 bis 3,4 Mrd. Euro pro schneearmen Winter ergeben. Da bei der Berechnung aber nur 50 % der Pistenflächen mit Beschneiungsanlagen ausgestattet sind,

wird auch angenommen, dass nur die Hälfte des möglichen BIP gehalten werden kann. Dies entspricht 0,85 bis 1,7 Mrd. Euro.

Dieser Wert tritt erst vollständig pro Jahr ein, wenn alle Winter schneearm wären. Teich u.a. (2007) gehen ebenfalls davon aus, dass bereits heute 40 % des Umsatzes des Gastgewerbes und der Pistenbetreiber über die Beschneiung mit Kunstschnee gesichert wird. Dieser Wert zeigt, dass bereits heute ein wesentlicher Nutzen der Anlagen vorliegt.

Die Maßnahme weist viele sekundäre Kosteneffekte auf. Hierzu liegt eine Reihe von Studien vor, die negative Folgen für Pflanzen und Tiere nachweisen. Zum Beispiel ziehen sich Vögel aufgrund des Lärms aus dem Gebiet zurück (u.a. Hahn 2004, Bayrisches Landesamt für Umwelt 2009). Darüber hinaus ist der Energie- und Wasserverbrauch der Anlagen ein Problem. Für die Beschneiung wird in großem Ausmaß Wasser benötigt. Das Bayrische Landesamt für Umwelt (2009) schätzt den Verbrauch für einen Kubikmeter Schnee auf 400-500 Liter Wasser. In der Gemeinde Davos wird bereits heute bis zu 35% des regionalen Wasserverbrauchs für die Beschneiungsanlagen genutzt (vgl. Teich u.a. 2007). Beurteilung der Maßnahme

Der Zweck der Maßnahmen ist die Sicherung der wirtschaftlichen Grundlage für die Tourismuswirtschaft in Wintersportregionen. Die Effektivität der Maßnahme ist gegeben, wenn die Winter insgesamt eine ausreichende Anzahl von Tagen mit Minusgraden aufweisen. Bei Minusgraden ist die Effektivität der Maßnahme sehr hoch. Bei Plusgraden müssen Spezialanlagen verwendet werden, welche die hier vorliegenden Kosten um ein Vielfaches übersteigen. Falls die Maßnahme von der öffentlichen Hand unterstützt wird, ist mit Mitnahmeeffekten zu rechnen. In großen Teilen werden aber private Akteure (ggf. organisiert in Zweckverbänden) die Finanzierung der Anlagen übernehmen. Die Anlagen stärken die klassische Wintersportinfrastruktur, bei der Installation von Beschneiungsanlagen wird mit privaten Investitionen in diesem Bereich gerechnet. Die Maßnahme wirkt lokal nur für die direkt beschneite Piste, wobei sich wirtschaftliche Folgen für das Gastgewerbe in der näheren Umgebung zeigen.

Die Maßnahme wird von Seiten des Naturschutzes stark kritisiert. Wie bereits oben genannt, treten Folgen für Artenvielfalt und den Lebensraum von Tieren und Pflanzen auf. Die Folgen des hohen Wasserverbrauchs können ebenfalls zu Schäden an Ökosystemen führen. Durch die Beschneiung wird in ein stark verwundbares, alpines Gebiet eingegriffen, in dem zerstörte Vegetation um sich zu erholen ein Vielfaches der Zeit der Prozesse im Flachland benötigt.

Beschneiungsanlagen zu betreiben ist eine regret-Maßnahme. Wo bereits Anlagen installiert sind, fällt bereits heute ein Nutzen an. Allerdings sind die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt immens und greifen in die stark sensiblen alpinen Gebiete ein. Der Nutzen nimmt mit schlechter Schneelage zu, allerdings müssen Temperaturen unter 0°Grad vorliegen, damit die Anlagen einsetzbar sind. Insofern ist die Wirksamkeit bei Szenarien mit einem hohen Temperaturanstieg eingeschränkt, bzw. beschränkt sich auf weniger Tage in der Saison.

### Tabelle 77: Auswertung der Maßnahme „Erhaltung der derzeitigen Tourismusangebote über Präparierung der Pisten“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Die wirtschaftliche Grundlage in Tourismusgebiete wird kurz- bis mittelfristig abgesichert. Es ist kein absolutes Schutzgut oder eine kritische Infrastruktur betroffen. |
| **Effektivität** | Mittel | Die Effektivität ist abhängig von der auftretenden Temperatur im Winter. Bei Temperaturen unter 0°C ist die Maßnahme sehr effektiv. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Voraussetzt, die Maßnahme wird hauptsächlich durch private Akteure durchgeführt. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Die Maßnahme wirkt vorübergehend, entsprechend ihrer Lebensdauer. Der Bau von Beschneiungsanlagen führt voraussichtlich zu weiteren Investitionen in die klassische Wintersportinfrastruktur. Investitionen in eine nachhaltige Anpassung der Tourismusangebote werden daher verdrängt. |
| **Reichweite** | Lokal/regional | Die Beschneiungsanlagen haben einen lokalen Effekt für die mit Anlagen ausgestatteten Pisten und die nähere Umgebung/touristische Region. |
| **Akzeptanz** | Niedrig/Mittel | Beim Gastronomiegewerbe und Übernachtungsbetrieben sowie Wirtschaftszweigen, die ebenfalls vom Wintersport profitieren, wird die Ausstattung mit Beschneiungsanlagen begrüßt. Allerdings stehen sowohl Teile der politischen Akteure als auch der Bevölkerung dem Ausbau sehr kritisch gegenüber. |
| **Regret/No-regret** | High-regret | Die Anlagen stellen einen starken Eingriff in den Wasserhaushalt dar und greifen in die empfindlichen alpinen Gebiete ein. |
| **Szenario-Variabilität** | Reduzierte Wirkung/keine Wirkung | Bei größerem Schneerückgang ist die Maßnahme wirksamer. Bei sehr hohen Lufttemperaturen im Winter (über 0°C) sind die zurzeit zur Verfügung stehenden Anlagen nicht einsetzbar. |

### 3.12.2 Anpassungsmaßnahme „Diversifikation der Angebote im Tourismus zu Sommer- bzw. Alljahrestourismus“

#### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Wie bereits in der Anpassungsmaßnahme zum Wintersporttourismus angesprochen, wird vorhergesagt, dass bis 2100 der Schneefall um 81% abnehmen wird (ggü. 1961-1990) (vgl. Regionaler Klimaatlas 2011). Im Mittelpunkt der Maßnahmen im Tourismusbereich stehen längerfristig Entwicklungen hin zur Diversifikation von Tourismusangeboten. Für klassische Wintersportregionen wird es notwendig sein, alternative Angebote für den Winter zu entwickeln, wie Wellnessreisen oder Konzerte. Der Ausbau des Sommertourismus oder Alljahrestourismus sollte ebenfalls vorangetrieben werden, so kann in das Wander- und Radwegenetz, in die Infrastruktur z.B. mit E-Bikes und deren Vermarktung investiert werden.

Wandern rückt in den letzten Jahren wieder stärker in den Fokus der Freizeit- und Ferienaktivitäten. Der Anteil der Urlauber, die ihren Urlaub als Radurlaub oder an einzelnen Tagen Aktivitäten mit den Rad unternehmen, steigt seit Jahren. Dieser Trend wird noch länger anhalten und wohl auch von einer Verschiebung des Urlaubs der Wintersporttouristen in andere Jahreszeiten (vgl. Klein 2010) profitieren.

Der Ausbau des Radwegenetzes steht meistens in der Verantwortung der Kommunen. Diese treten als Bauherr auf und finanzieren einen Großteil der Investitionen. Bereits heute gibt es Förderprogramme für den Ausbau des Radwegenetzes, u.a. auf EU-Ebene. Die Maßnahme sollte innerhalb der nächsten 10 Jahre umgesetzt werden, da bereits zu diesem Zeitpunkt deutlich weniger Wintersporttouristen erwartet werden. Darüber hinaus braucht es eine Vorlaufzeit von einigen Jahren, um eine Region als Radreiseregion am Markt zu etablieren.

#### Kosten- und Nutzenerfassung

Die Anpassungsmaßnahme konzentriert sich auf den Ausbau eines regionalen Radwegenetzes inklusive dessen Vermarktung. Die Maßnahme ist damit nicht für alle Wintersportregionen geeignet und ist nur eine Möglichkeit den Folgen des Klimawandels entgegen zu wirken. Für den Bau von Radwegen werden bei bisher bestehenden Projekten Kosten in der Höhe 100.000-340.000 Euro/km angegeben. (Quelle: Rheinland-Pfalz 2011, Renger 2011). Um dem Touristen ein attraktives Radwegenetz zur Verfügung zu stellen, wird angenommen, dass ein Netz von 1.000 km Radwege notwendig ist (z.B. Radwege Ostallgäu). Es wird mit einem bestehenden Netz von 700 km gerechnet, die bereits vorliegen. Allerdings müssen diese verbunden und erweitert werden. Für den Ausbau des Radwegenetzes fallen für diese zusätzlichen 300 km Kosten zwischen 30 Mio. und 102. Mio an. Diese Investitionen müssen in den nächsten 10-15 Jahren getätigt werden, da bereits 2020 die Schneesicherheit in deutschen Skigebieten deutlich zurückgeht (vgl. Agrawala 2007). Darüber hinaus soll angenommen werden, dass die Radwege alle 20 Jahr erneuert werden müssen und dies die Hälfte des Erstaufbaus des Radwegs kostet. Somit ergeben sich bis 2100 Gesamtkosten von 90 – 306 Mio. Euro. Dies stellt von 2010 bis 2100 einen Betrag von 1 – 3,4 Mio. Euro pro Jahr dar.

Der zweite Baustein ist ein Marketingkonzept in Verbindung mit der Entwicklung und Umsetzung einer Internetpräsenz, die das Wegenetz darstellt und bekannt macht. Für die Region Ostallgäu wurde ein solches Marketingkonzept entwickelt. Enthalten ist dabei die Zertifizierung und Bewerbung von radsportfreundlichen Unterkünften, die einheitliche Beschilderung des Netzes, eine Radhotline, die Medienpräsenz auf verschiedenen Sportevents und die Erstellung von Informationsmaterial, wie Flyer und Broschüren. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Konzeptes ist die Entwicklung und Umsetzung einer Internetpräsenz, die das Radnetz im Internet anhand einer interaktiven Karte darstellt und natürlich in diesem Medium bewirbt. Für das Projekt wurden 120.000 Euro für 4 Jahre aufgewendet (vgl. BMVBS 2010). Dies entspricht für die Erstellung 30.000 Euro pro Jahr (für die ersten vier Jahre). Weiter sollen Kosten zur Instandhaltung und Weiterentwicklung des Portals und für weitere Informationskampagnen von 5.000-10.000 Euro/Jahr anfallen.

Für die Nutzenerfassung werden die potentiellen Einnahmen aufgrund des Radtourismus abgeschätzt. Im ADFC-Radreiseportal sind 200.000 km enthalten, dies soll als Basis für die Gesamtfläche benutzt werden. Für 1.000 km bedeutet dies, dass 0,005 % der Reisen auf dieser Strecke ablaufen. Der ADFC gibt das Potential bei 5 Mio. Personen in Deutschland an, die einen Radurlaub durchführen würden (nach ADFC, vgl. Kobernuß 2009), so kommen 25.000 Personen als Gäste in Frage. Es wird auch angenommen, dass pro Reise ein bis zwei Übernachtungen inbegriffen sind. Nach Daten des Elberadweges geben Radreisende 60 Euro pro Übernachtung aus (vgl. Giebeler & Froitzheim 2010). Auf Basis dieser Ausgaben ergeben sich 1,5 bis 3 Mio. Euro an Einnahmen in der betrachteten Region, die die Schäden durch den wegbleibenden Wintertourismus mildern können.

Ein sekundärer Effekt ist die positive Wirkung auf die Gesundheit, wenn Urlauber sich sportlich betätigen, was langfristig zu geringeren Gesundheitskosten führt. Dies für den Ausbau eines Radwegenetzes verlässlich abzuschätzen, ist allerdings so nicht möglich, zumal die Gesundheitseffekte des Fahrradtourismus auch mit den Gesundheitseffekten der derzeitigen Nutzung (Wintertourismus) verglichen werden müssten. Als weiterer Sekundäreffekt wird die Umweltverträglichkeit des Radtourismus im Gegensatz zu einem extensivem Wintertourismus höher eingeschätzt. Die Präparierung der Pisten beeinträchtigt den Boden und die angrenzende Bepflanzung.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Maßnahme schützt die wirtschaftliche Basis der Regionen, die stark vom Wintersporttourismus geprägt sind. Durch den Klimawandel ist aber in diesem Fall kein absolutes Schutzgut gefährdet. Durch den Ausbau des Radwegenetzes kann nur ein Teil der wegfallenden Einnahmen durch den ausbleibenden Wintersporttourismus kompensiert werden. Dies trifft aber für alle Maßnahmen in dem Bereich des Alljahres- und Sommertourismus zu: da es sich nicht um schneesichernde Maßnahmen handelt, können diese nicht direkt die Wirkungen des Klimawandels auf den Wintersporttourismus mildern. Mit der Maßnahme werden neue Betätigungsfelder und Zielgruppen angesprochen und die wirtschaftliche Aktivität z.T. in andere Jahreszeiten verlagert. Bei einer Pflege des Radwegenetzes ist mit einer langanhaltenden Wirkung der Anpassungsmaßnahmen zu rechnen. Durch die Maßnahme entstehen weitere Wirkungen für die Beherbergungsbetriebe und Gastronomie, da sich diese Akteure auf die neue Zielgruppe einstellen müssen. Je nach Auslegung und Größe des Radwegenetzes ist die Wirkung lokal bis regional. Positive Effekte ergeben sich für die lokale/regionale Tourismusbranche, für die es eine neue Zielgruppe zu

erschließen gilt. Dabei stehen Gastronomie und Hotellerie, aber auch Radreiseveranstalter und lokale Infrastruktur, wie Radwerkstätten, im Fokus. Die Radwege können darüber hinaus von der lokalen Bevölkerung genutzt werden und können sowohl bei den Anwohnern als auch bei den Urlaubern zu positiven Gesundheitswirkungen führen, die langfristig sogar die Gesundheitskosten senken. Von den Impulsen durch die Radtouristen profitieren auch weitere Wirtschaftszweige, wie handwerkliche Betriebe und der Einzelhandel. Die politische Akzeptanz für die Maßnahmen in diesem Bereich scheint im Moment relativ hoch zu sein. Der Ausbau des Radwegenetzes ist eine no-regret Maßnahme, die bei erfolgreicher Vermarktung Radtouristen anzieht. Die Szenario-Variabilität ist gegeben. Das Radwegenetz bietet auch ohne wesentliche Klimaveränderungen Vorteile für die Region. Maximal ist das Potenzial für Radtourismus bei weniger schneesicheren Gebieten in Deutschland höher, da mehr Personen über einen Urlaub in den anderen drei Jahreszeiten nachdenken. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist ausgeglichen, den Kosten von 1 bis 3,4 Mio. Euro pro Jahr steht eine ähnliche Höhe an Umsätzen gegenüber, die die Einbußen durch den Wintersporttourismus teilweise auffangen können. Die Maßnahme wirkt mit abnehmender Schneesicherheit einer Folge des Klimawandels entgegen, die für einzelne Ferienregionen in Deutschland sehr starke Auswirkungen haben wird. Darüber hinaus können bereits jetzt neue Urlaubergruppen erschlossen werden.

**Tabelle 78: Auswertung der Maßnahme „Diversifikation der Angebote im Tourismus zu Sommer- bzw. Alljahrestourismus“**

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Nice-to-have | Die wirtschaftliche Grundlage in Tourismusgebieten wird abgesichert. Es ist kein absolutes Schutzgut oder eine kritische Infrastruktur betroffen. |
| **Effektivität** | Mittel | Maßnahme kann die Auswirkungen des Klimawandels auf Wintersportregionen nur teilweise kompensieren. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Die Maßnahme muss öffentlich finanziert werden. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Bei einer Pflege und Instandhaltung des Netzes wirkt die Maßnahme langanhaltend. Darüber hinaus sind weitere Wirkungen in der Tourismuswirtschaft zu erwarten, die einen Strukturwandel im Tourismus vorantreiben, z.B. Angebot von Übernachtungsmöglichkeiten und Gastronomieangebote im Sommer oder spezielle für Radtouristen. |
| **Reichweite** | Lokal/regional | Das Radwegenetz wird je nach Auslegung lokale bis regionale Wirkungen zeigen. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Die Akzeptanz für einen Ausbau des Radewegenetzes ist auf politischer Ebene aber auch in der Bevölkerung gegeben. |
| **Regret/No-regret** | No-regret | Ausbau ist unabhängig vom Klimawandel sinnvoll und auch nutzbar. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Es liegt Szenario-Variabilität vor. |

# 3.13 Handlungsfeld Bevölkerungsschutz

## 3.13.1 Anpassungsmaßnahme „Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen)“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Der Klimawandel betrifft den Bereich des Bevölkerungsschutzes vor allem bei Katastrophen aufgrund von Extremwetterereignissen, wie Dürren, Stürmen und Starkniederschlägen, sowie bei Hochwässern. Eine weitere Bedrohung geht von Epidemien aus, etwa im Fall eingeschleppter Krankheiten. Der Bevölkerungsschutz und die beteiligten Institutionen, wie Katastrophenschutzbehörden und –organisationen, müssen sich auf eine höhere Intensität und auf ein häufigeres Eintreten von solchen Ereignissen einstellen. Darüber hinaus werden neue Ausprägungen von Katastrophen auftreten, z.B. bei Ausbrüchen von Krankheiten, die bisher in Deutschland nicht vorkommen oder die weitere Verbreitung von Krankheiten, die bisher nur räumlich begrenzt auftreten. Im Mittelpunkt stehen der Schutz der Bevölkerung und der kritischen Infrastrukturen, wie Energie- und Wasserversorgung oder Telekommunikationsnetze. Eine weitere Herausforderung stellt sich, da die Institutionen des Katastrophenschutzes selbst durch die Extremwetterlagen betroffen sein werden.

Die Katastrophenschutzorganisationen müssen sich auf diese klimawandelbedingten Gefahren vorbereiten, indem sie ihre Strukturen und Material anpassen bzw. das Thema in Aus- und Weiterbildung integrieren (vgl. Riegel 2008; Geier, 2009, Krings 2010). Bei verschiedenen Ereignissen, wie dem Elbe-Hochwasser 2002 und dem Oder-Hochwasser 1997, aber auch bei Katastrophenschutzübungen wurde deutlich, dass die Kommunikation und Koordination zwischen den verschiedenen Handlungsträgern verbessert werden muss (u.a. BBK 2011, Kreutzer 2008, Geier 2009). Ein schnelles Eingreifen bzw. eine gut koordinierte Vorgehensweise sind eine Grundvoraussetzung, um bei Katastrophen schnell und effizient zu helfen. Gerade für die Verbesserung von Koordinations- und Kommunikationsstrukturen sind Katastrophenschutzübungen geeignet, die eine einsatzähnliche Situation herstellen (vgl. Geier 2009).

Die verantwortlichen Katastrophenschutzbehörden sind öffentliche Institutionen auf verschiedenen Ebenen (Bund, Länder, Kreise). Der Bevölkerungsschutz ist föderal organisiert und in jedem Bundesland unterschiedlich aufgebaut. Anforderungen an Organisationen im Bevölkerungsschutz werden auf Ebene der Katastrophenschutzbehörden vorgegeben. Die Umsetzung, bspw. Umfang und Häufigkeit von Übungen ist auf Landesebene geregelt, etwa in Katastrophenschutzverordnungen. Die Finanzierung der öffentlichen Katastrophenschutzorganisationen, wie Feuerwehren und des Technischen Hilfswerks, erfolgt vollständig aus öffentlichen Geldern. Private Hilfsorganisationen, wie das Deutsche Rote Kreuz, Malteser Hilfsdienst oder Arbeiter-Samariter-Bund, werden von den Ländern und Kommunen unterstützt, finanzieren sich aber teilweise selbst. Für den Vollzug bestehen bereits Prozesse und Institutionen, so dass hier kein deutlicher Mehraufwand anfällt. Die Extremwettereignisse werden mittel- bis langfristig in Intensität und Häufigkeit zunehmen, was den Katastrophenschutz vor wachsende Herausforderungen stellt und in

zunehmendem Maße eine Koordination der verschiedenen Hilfs- und Rettungsdienste erfordert.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Wie erwähnt gibt es bei kreis- bzw. länderübergreifenden Katastrophen derzeit Verbesserungsbedarf bei der Koordination und Kommunikation zwischen verschiedenen Katastrophenschutzbehörden und den unterschiedlichen operativen Einsatzkräften. Vor diesem Hintergrund findet seit 2004 alle zwei Jahre eine „Länderübergreifende Krisenmanagementübung“ (LÜKEX) statt. Dies ist eine Stabsrahmenübung, d.h. es finden keine operativen Maßnahmen statt, sondern es handelt sich um ein Übungsszenario, in dem die Außenwelt durch die Übungsleitung dargestellt wird.

Deshalb wird für die hier vorgenommene Kostenberechnung angenommen, dass pro Bundesland eine zusätzliche kreisübergreifende Vollübung pro Jahr durchgeführt wird. Bei einer Vollübung müssen Einheiten und Einrichtungen tatsächlich ein Übungsszenario abarbeiten. Im Jahr 2010 führte das Land Nordrhein-Westfalen angeschlossen an die länderübergreifende LÜKEX-Übung eine Einsatzübung mit 3.000 Beteiligten in vier Städten in NRW durch. Laut Landesregierung NRW fielen Kosten in Höhe von 300.000 Euro an. Da NRW das bevölkerungsreichste Bundesland ist, werden die bundesweiten Kosten anteilig anhand der Bevölkerung der Bundesländer (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011a) hochgerechnet. Dies ergibt eine Summe von insgesamt 1,4 Mio. Euro pro Jahr für eine weitere, große Katastrophenschutzübung in jedem Bundesland.

Der Nutzen von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen ist schwierig zu evaluieren. Durch Trainingsmaßnahmen verbessert sich die Kommunikation und Koordination der Einsatzkräfte, was ein schnelleres und zielgerichtetes Eingreifen ermöglicht. Eine bessere Kommunikation könnte evtl. auch einen weniger gravierenden Verlauf von Schadensereignissen erreichen, bspw. indem im Fall von Hochwassern Deichbrüche oder die Überflutung kritischer Gebiete verhindert werden, und so ein Teil der Schadenkosten vermieden werden.

Da neben besseren Trainingsmaßnahmen auch viele andere Faktoren einen Einfluss auf den Ablauf einer solchen Krisensituation haben, ist der Anteil der Übungen auf einen weniger gravierenden Verlauf nicht zu quantifizieren. Deutlich ist allerdings, dass die Kosten der Übungen im Vergleich zu den möglichen Schadenskosten im Promillebereich liegen.

So ist die mögliche Schadenshöhe von Extremwetterereignissen insbesondere für Hochwasserkatastrophen gut dokumentiert. So wurden bspw. die Gesamtschäden durch das August-Hochwasser 2002 auf 11,6 Mrd. Euro geschätzt. Im Bundesland Sachsen entstand mit 8,6 Milliarden Euro der Großteil der Schäden. Darüber hinaus wurden in Sachsen 21 Menschen getötet. (vgl. Umweltbundesamt 2007). Die Gesamtschäden des Hochwassers 1999 in Bayern belaufen sich auf 335,8 Mio. EUR (656,7 Mio. DM) (vgl. Umweltbundesamt 2007). Basierend auf diesen und anderen Zahlen geht die EEA (2008) bei einem durchschnittlichen Hochwasser in Europa von Schäden in Höhe von 0,5 Promille des BIP aus, ein „Jahrhunderthochwasser“ bedeutet Schäden in Höhe von bis zu 2 Promille des BIP. Die dargestellten Schadenshöhen sind hier nur exemplarisch genannt. Durch eine bessere Ausbildung und Koordination der Katastrophenschutzorganisationen kann natürlich nur ein kleiner Kostenanteil reduziert werden.

### Beurteilung der Maßnahme

Der Schutz der Bevölkerung im Fall extremer Wetterereignisse ist ein Teil der staatlichen Schutz- und Fürsorgepflichten. Die Effektivität der Maßnahme ist begrenzt, da es nicht möglich ist, mit Übungen sowie mit verbesserter Koordination und Kommunikation allein Schäden abzuwenden. Andererseits sind eine effiziente Koordination und Kommunikation, und das Einüben entsprechender Routinen durch Übungen und Weiterbildung eine Voraussetzung dafür, dass der Katastrophenschutz im Krisenfall schnell und effektiv funktioniert. Mitnahmeeffekte treten nicht auf, da die Maßnahme nur durch öffentliche Gelder und Institutionen initiiert werden kann. Kommunikations- und Koordinationsprozesse haben zwar, wenn sie einmal etabliert sind, über längere Zeit bestand. Sie müssen allerdings durch regelmäßige Übungen stets wieder eingeübt werden, und ggf. an neue Entwicklungen (bspw. neue Kommunikationsformen) angepasst werden. Die Wirkung der Maßnahme ist durch den kreisübergreifenden Ansatz regional. Die gesellschaftliche Akzeptanz in der Öffentlichkeit ist voraussichtlich gegeben, da die Sicherheit der Bevölkerung im Mittelpunkt steht. In der Folge der verschiedenen Hochwasserereignisse zu Beginn der 2000er Jahre wurden die bestehenden Probleme und neuen Herausforderungen des Katastrophenschutzes in Deutschland deutlich. Daraufhin wurde mit LÜKEX eine regelmäßige länderübergreifende Katastrophenschutzübung installiert. Das Durchführen von weiteren Katastrophenschutzübungen ist in diesem Zusammenhang eine regret-Maßnahme: Zwar hat die Maßnahme auch Zusatznutzen für andere denkbare Krisenszenarien und Katastrophen, andererseits sinkt der Nutzen der Maßnahme mit Bezug auf den Klimawandel, falls sich die erwarteten Klimafolgen nicht einstellen.

Bei der Kosten- und Nutzenerfassung können die Kosten für die Maßnahme anhand von realen Beispielen hochgerechnet werden. Die Bestimmung des Nutzens ist dagegen problematisch, da die direkten Auswirkungen der Übungen auf verringerte Gesamtschadenskosten nicht quantifiziert werden können. Viele verschiedene Merkmale prägen den Verlauf eines jeden Schadensereignisses, so dass auch ein Vergleich zwischen verschiedenen Katastrophenereignissen sehr schwierig ist. In der Betrachtung kann daher nur festgestellt werden, dass die Kosten der Übungen im Verhältnis zu den möglichen Schadenskosten verschwindend gering sind; damit ist jedoch nicht ausgesagt, dass die Kosten durch den Nutzen der Maßnahme gerechtfertigt sind.

## Tabelle 79: Auswertung der Maßnahme „Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen)“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have<br>Absoluter Schutzgedanke, Schutz kritischer Infrastrukturen | Im Vordergrund steht die Sicherheit und Gesundheit der Bevölkerung und der Schutz kritischer Infrastrukturen. |
| **Effektivität** | Gering | Durch Weiterbildungsmaßnahmen kann Schaden nur teilweise abgemildert werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Finanzierung ist nur durch öffentliche Gelder möglich. |
| **Dynamische Wirkung** | Ja, anhaltend | Die Maßnahme wirkt langanhaltend, da Koordinations- und Kommunikationsprozesse verbessert werden. Für eine anhaltende Wirkung müssen Übungen dabei regelmäßig wiederholt werden. Die Maßnahme etablierte einen Prozess, in den auch andere Ziele oder immer wieder verändernde Prognosen zu Klimafolgen eingebunden werden können. |
| **Reichweite** | Regional | Die Maßnahme ist so konzipiert, dass die Trainings eine regionale Wirkung haben. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Die Sicherheit und Gesundheit der Bevölkerung sowie kritischer Infrastrukturen stehen im Mittelpunkt, so dass von einer hohen Akzeptanz ausgegangen wird. Probleme könnten bei Unternehmen, die Hilfskräfte freistellen, auftreten bzw. kann auf politischer Ebene auf das Lükex-projekt verwiesen werden. |
| **Regret/No-regret** | Regret | Zwar bestehen Zusatznutzen auch für andere Arten von Krisenszenarien, allerdings stellt sich der Nutzen der Maßnahme nur ein, wenn extreme Wetterereignisse tatsächlich eintreten. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Es liegt Szenario-Variabilität vor. |

## 3.13.2 Anpassungsmaßnahme „Überarbeitung von Katastrophenschutzplänen“

### Beschreibung der Anpassungsmaßnahme

Extremwettereignisse, z.B. Starkregenereignisse und die darauf folgenden Hochwässer, können durch den Klimawandel deutlich intensiver und häufiger, auftreten (vgl. Regionaler Klimaatlas 2011). Die Katastrophenschutzbehörden müssen ihre Prozesse auf diese neuen Ausprägungen der Ereignisse ausrichten. Die Verantwortung für den Katastrophenschutz liegt bei den Katastrophenschutzbehörden, auf allen Ebenen bis zu Landkreisen und kreisfreien Städten (unteren Behörden). Unter anderem sind die Katastrophenschutzpläne auf die möglichen Folgen der Klimaauswirkungen anzupassen. Für besondere Gefahrenlagen sind einzelne Katastrophenschutz-Sonderpläne anzufertigen, die konkrete Handlungsempfehlungen enthalten. In Brandenburg sin die Sonderpläne u.a. für Hochwasser und Unwetterkatastrophen (Schnee, Eis, Stürme) zu erstellen (Land Brandenburg 1995).

Besonders sensibilisiert sind Kommunen, die bereits einer besonderen Gefährdung ausgesetzt sind, z.B. durch Störfälle in Kernkraftwerken, großen Produktionsanlagen der chemischen Industrie oder einer besonderen Hochwassergefahr. In verschiedenen Bundesländern, z.B. Hessen und Nordrhein-Westfalen, werden in den Katastrophenschutzgesetzen Sonderschutzpläne für besondere Gefahrenobjekte gefordert (vgl. Reichert 2002). Van Ierland et al. (2007) bewerten u.a. auch die Erstellung und Aktualisierung von Evakuierungsplänen und zählen diese über alle betrachteten Handlungsfelder hinweg zu einer der wichtigsten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. In Deutschland sind auch Evakuierungspläne in den Katastrophenschutzplänen integriert, meist als Sonderpläne für bestimmte Ereignisse, wie Störfälle in technischen Anlagen.

Die Überarbeitung von lokalen und regionalen Katastrophenschutzplänen, vor allem Sonderplänen ist eine öffentliche Aufgabe und ist vollständig durch öffentliche Gelder zu finanzieren. Die Maßnahme sollte in den Gebieten, die Klimarisiken ausgesetzt sind, kurzfristig ergriffen werden: Auch wenn die Wahrscheinlichkeit von Extremereignissen sich erst im Zeitablauf verändert, können diese Ereignisse dennoch jederzeit eintreten.

### Kosten- und Nutzenerfassung

Bei der Erstellung/Überarbeitung der Katastrophenschutz-Sonderpläne ist als erstes zu prüfen, durch welche Schadensereignisse ein Landkreis oder eine kreisfreie Stadt besonders gefährdet ist. Für die weitere Berechnung wird angenommen, dass in jedem Landkreise oder kreisfreien Stadt eine besondere Gefahrenlage vorliegt, z.B. an der Küste durch Sturmfluten, an Flussläufen durch Hochwässer, im Gebirge durch Erdrutsche oder Lawinen, in flachen Gebieten Norddeutschlands durch Stürme oder Sandstürme, etc.

Das Sächsische Innenministerium vergibt für Landkreise/kreisfreie Städte eine Förderung von bis zu 7.500 Euro für die Erstellung und Aktualisierung von externen Notfallplänen für Unfälle mit gefährlichen Stoffen, die den obengenannten Sonderplänen entsprechen. . Diese Förderung erhalten die unteren Katastrophenschutzbehörden, wenn sie ihre Pläne

aktualisieren oder neu erstellen. Für die weitere Berechnung soll von Kosten für einen neuen Plan von 20.000 Euro für einen Landkreis mit weniger als 100.000 Einwohnern ausgegangen werden. Für eine Aktualisierung fällt die Hälfte der Kosten an. Die weitere Kostenstaffelung beträgt für einen neuen Plan: für 200.000 bis 300.000 Einwohner: 25.000 Euro, für 300.000 bis 400.000 Einwohner: 30.000 Euro, 400.000 bis 500.000 Einwohner: 35.000 Euro, 500.000 bis 750.000: 40.000 Euro, über 500.000 Einwohner: 45.000 Euro.

Es wird davon ausgegangen, dass die Sonderpläne im Zeitraum 2011-2019 erstellt werden müssen. Wenn bereits ein oder mehrere Sonderpläne für Wetterereignisse vorliegen, sollten diese ebenfalls bis 2019 aktualisiert und ggf. an die Erfordernisse angepasst werden, die sich aus verbessertem Wissen über mögliche Klimafolgen ergeben. Für die Bemessung der Kosten wird angenommen, dass die Hälfte der Landkreise/Kreisfreien Städte bereits Pläne besitzt und diese nur angepasst werden müssen, und dass die Kosten für eine Aktualisierung die Hälfte der Kosten für einen neu erstellten Plan ausmachen. Für die 412 Landkreise und kreisfreien Städten in Deutschland (Statistisches Bundesamt 2011c) belaufen sich die Kosten auf 8,1 Mio. Euro für alle Landkreise/kreisfreien Städte in Deutschland für 2011-2019. Dies entspricht 900.000 Euro pro Jahr.

**Tabelle 80: Kosten der Erstellung von Katastrophenschutzpläne für Landkreise und kreisfreien Städte in Deutschland**

| Einwohnerzahl der Landkreise/kreisfreien Städte | Anzahl der Landkreise/ kreisfreien Städte | Kosten Aktualisierung (in Euro) | Kosten Neuerstellung (in Euro) |
|---|---|---|---|
| <100.000 | 99 | 495.000 | 990.000 |
| 100.000-200.000 | 182 | 1.137.500 | 2.275.000 |
| 200.000 -300.000 | 73 | 547.500 | 1.095.000 |
| 300.000-400.000 | 26 | 195.000 | 390.000 |
| 400.000-500.000 | 12 | 105.000 | 210.000 |
| 500.000-750.000 | 15 | 150.000 | 300.000 |
| 750.000 und mehr | 5 | 56.250 | 112.500 |
| Summe | 412 | 2.686.250 | 5.372.500 |

Die Pläne sollen im Anschluss alle 10 Jahre aktualisiert werden. Für die Aktualisierung fällt, wie oben angenommen, je die Hälfte der Kosten bei einer Neuerstellung an, also zw. 10.000 und 22.500 Euro. Zwischen 2020-2100 ergeben sich somit 43 Mio. Euro für die regelmäßige Aktualisierung der Pläne in allen deutschen Landkreisen/kreisfreien Städten. Da bis 2060 eine Abnahme der Bevölkerung in Deutschland auf ca. 66 Mio. Personen vorhergesagt wird (Basis 2011: 82 Mio.) (vgl. Eurostat 2011a, Eurostat 2011b), sollen die Gesamtkosten um 18% reduziert werden. Die Kosten für die Aktualisierungen betragen dann 35 Mio. Euro. Ab 2020 sind dies 440.000 Euro pro Jahr.

**Tabelle 81: Kosten Katastrophenschutzpläne**

| | |
|---|---|
| Anzahl Gemeinden in Deutschland | 412 |
| Kosten für Erstellung/Aktualisierung (2011-2019) | 8,1 Mio. Euro |
| **Kosten pro Jahr (2011-2019)** | **0,90 Mio. Euro/a** |
| Kosten für Aktualisierung 2020-2100 (Aktualisierung aller 10 Jahre) | 35 Mio. Euro |
| **Kosten pro Jahr (2020-2100)** | **0,44 Mio Euro/a** |

Wie bei der Anpassungsmaßnahme „Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen)“ kann ein Nutzen der Maßnahme nicht quantifiziert werden.

Durch einen aktuellen Katastrophenschutzplan bzw. Sonderpläne für Extremwetterereignisse ist ein schnellerer und effektiverer Schutz der Bevölkerung im Katastrophenfall möglich, wodurch insbesondere Verletzungen und Todesfälle vermieden werden können. Da eine Evakuierung sehr viele einzelfallspezifische Merkmale aufweist, ist es jedoch nicht möglich, den Beitrag eines aktualisierten Evakuierungsplans an den vermiedenen Schäden zu berechnen.

### Beurteilung der Maßnahme

Die Anpassungsmaßnahme zielt auf ein absolutes Schutzgut ab, nämlich die Sicherheit der Bevölkerung. Die Pläne greifen im Fall eines Schadensereignisses und tragen zur Vermeidung von Schäden bei, einschließlich vermiedener Verletzungen und Todesfälle. Katastrophenschutzpläne und zugehörige Sonderpläne definieren Zuständigkeiten und Abläufe im Krisenfall, und sind damit notwendige Voraussetzung für effektives und rechtzeitiges Eingreifen im Gefahrenfall, z.B. zur Information und Evakuierungen der Bevölkerung. Sie sind ihrerseits auf funktionierende Wetterinformations- und Warnsysteme angewiesen.

Die Anpassungsmaßnahme ist so angelegt, dass die Pläne regelmäßig aktualisiert werden und an neue Ausprägungen des Klimawandels angepasst werden, so dass die Wirkung dauerhaft gewährleistet ist. Die Wirkebene ist lokal bzw. regional. Die gesellschaftliche und politische Akzeptanz ist hoch, da sie die Sicherheit der Bevölkerung betrifft. Die Erstellung der Pläne ist eine regret-Maßnahme: Der Plan muss auf ein bestimmtes Krisenszenario oder eine bestimmte Gefahrensituation hin erstellt sein, bspw. auf eine Hochwasserkatastrophe. Der Nutzen für anders geartete Katastrophenfälle ist begrenzt; zudem werden sich viele Gemeinden jeweils nur wenigen möglichen Krisenszenarien ausgesetzt sehen. Die Wirkung als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel ist davon abhängig, dass die prognostizierten Ereignisse auch tatsächlich eintreten.

Da der Nutzen der Maßnahme nicht quantifiziert werden kann, lässt sich nur ein allgemeines Fazit ziehen. Wie im Beispiel der „Aus- und Weiterbildung von Katastrophenschutzorganisationen (Katastrophenschutzübungen)“ dargestellt, sind auch hier die Kosten der Maßnahme verschwindend gering im Verhältnis zu den Kosten, die durch ein

Schadensereignis entstehen können. Da es jedoch nicht möglich ist, den Beitrag des erstellten Planes zur Vermeidung der Schadenskosten zu beziffern, bedeutet dies nicht, dass die Kosten der Erstellung und Aktualisierung durch den Nutzen in jedem Fall gerechtfertigt sind.

### Tabelle 82: Auswertung der Maßnahme „Überarbeitung von Katastrophenschutzplänen“

| Kriterien | Bewertung | Erläuterung |
|---|---|---|
| **Relevanz** | Need-to-have, Absoluter Schutzgedanke, Schutz kritischer Infrastrukturen | Im Vordergrund steht die Sicherheit und Gesundheit der Bevölkerung und der Schutz kritischer Infrastrukturen. |
| **Effektivität** | Gering | Durch auf Extremwettereignisse bezogene Katastrophenschutz- Sonderpläne kann Schaden nur teilweise abgemildert werden. |
| **Mitnahmeeffekte** | Kein | Finanzierung ist nur durch öffentliche Gelder möglich. |
| **Dynamische Wirkung** | Nein | Die Maßnahme wirkt langanhaltend. Allerdings sollten die Pläne regelmäßige aktualisiert und nachjustiert werden. Die Maßnahme beinhaltet dies bereits. Die Maßnahme führt zu keinen strukturellen Veränderungen darüber hinaus. |
| **Reichweite** | Lokal/regional | Die Maßnahme wirkt lokal bzw. regional für das im Plan abgedeckte Gebiet. |
| **Akzeptanz** | Hoch | Die Sicherheit und Gesundheit der Bevölkerung stehen im Mittelpunkt. |
| **Regret/No-regret** | Regret | Die Sonderpläne werden auf spezifische Krisenszenarien und Gefahrensituationen hin erstellt, der Nutzen für andersartige Krisen ist eher begrenzt. |
| **Szenario-Variabilität** | Ja | Es liegt Szenario-Variabilität vor. |

# 4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, ein konsistentes Instrumentarium für sektorübergreifende Kosten-Nutzen-Analysen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu entwickeln und dieses Instrumentarium auf eine Reihe von Fallbeispielen aus allen Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie anzuwenden. Auf diese Weise soll eine Grundlage geschaffen werden, um die vorhandenen Anpassungsmöglichkeiten über Handlungsfelder hinweg zu priorisieren, geeignete Maßnahmen für die Umsetzung auszuwählen und diese zeitlich einzuordnen. Die Priorisierung selbst war dabei nicht Ziel des Projekts, vielmehr ging es darum die nötigen Informationen für einen Priorisierung in strukturierter und vergleichbarer Form zusammenzustellen.

Die Entwicklung des Instrumentariums wird erschwert durch die Vielfalt der Auswirkungen des Klimawandels und der betroffenen Handlungsfelder und Schutzgüter, sowie damit verbunden auch die Vielfalt der Maßnahmen zur Klimaanpassung. Darüber hinaus spielt die zeitliche Dimension eine große Rolle: einige Maßnahmen müssen jetzt eingeleitet werden, damit sie nach Jahrzehnten ihre volle Wirksamkeit entfalten können; andere Maßnahmen erzeugen nur kurzlebige Effekte, und müssen daher regelmäßig wiederholt werden. Bei der Auswahl einer effizienten Kombination von Maßnahmen muss daher auch deren zeitliche Anordnung berücksichtigt werden.

## Beschreibung der Maßnahmen nach einheitlichem Raster als Grundlage

Um die unterschiedlichen Maßnahmen einheitlich darzustellen und vergleichbar zu machen, bietet sich eine Kosten-Nutzen-Bewertung an, die alle (positiven und negativen) Wirkungen der Maßnahmen in Geldeinheiten bemisst. Eine reine Kosten-Nutzen-Bewertung stößt allerdings in mancherlei Hinsicht an Grenzen: abgesehen von den Schwierigkeiten, bestimmte Wirkungskategorien zuverlässig zu quantifizieren (insbesondere die nicht marktgängigen Werte wie Biodiversität) gilt es auch, weitere praktische Aspekte der Umsetzung abzubilden: etwa die politische und gesellschaftliche Akzeptanz und Durchsetzbarkeit, den Vollzugsaufwand für die öffentliche Hand, das Risiko von Mitnahmeeffekten, aber auch die oben erwähnten Abwägungen bei der Planung von Maßnahmen im Zeitablauf. Diese Erwägungen lassen sich in einer reinen Kosten-Nutzen-Analyse nicht angemessen abbilden.

Für die Untersuchung von Maßnahmen der unterschiedlichen Handlungsfelder der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) wurde daher ein Kriterienset entwickelt, welches über die reine Kosten- und Nutzen-Analysen hinaus weitere Kriterien einbezieht. Das Kriterienset setzt sich aus den drei großen Bereichen Basisinformationen, Kosten-/Nutzen-Erfassung und Beurteilung zusammen. Die einzelnen Kriterien sind in der folgenden Übersicht dargestellt.

**Abbildung 13: Verwendetes Kriterienset**

| Basisinformationen | Kosten-/Nutzen-Erfassung | Beurteilung |
|---|---|---|
| - Handlungsfeld<br>- Art der Maßnahme<br>- Bedeutung der Maßnahme für die öffentliche Hand<br>  ○ umsetzende Akteure<br>  ○ öffentliche Finanzierung<br>  ○ Ebene der Umsetzung<br>- Vollzug<br>  ○ Vollzugsaufwand<br>  ○ Finanzierungs-/ Anreizinstrumente<br>- Zeitliche Dimension<br>  ○ Zeithorizont<br>  ○ Time-lag<br>  ○ Lebensdauer | - Kosten<br>  ○ betriebswirtschaftliche Kosten<br>  ○ weitere wirtschaftl. Folgen<br>  ○ externe Kosten<br>- Nutzen<br>  ○ Primärnutzen<br>  ○ Sekundärnutzen<br>- Verlässlichkeit der Aussagen | - Relevanz<br>- Effektivität<br>- Mitnahmeeffekte<br>- Dynamischer Anreiz<br>- Reichweite<br>- Akzeptanz<br>  ○ gesellschaftliche Akzeptanz<br>  ○ politische Akzeptanz<br>- Wechselwirkungen<br>- Flexibilität<br>  ○ Regret/no-regret<br>  ○ Szenario-Variabilität |

Die erste Rubrik enthält Kriterien zur Beschreibung der Grundzüge der betrachteten Maßnahmen, z.B. das Handlungsfeld der Deutschen Anpassungsstrategie, die umsetzenden Akteure oder ob die Finanzierung durch die öffentliche Hand erfolgt. Die zweite Rubrik zeigt die Indikatoren zur eigentlichen Kosten- und Nutzenerfassung inklusive der Differenzierung in primäre und sekundäre Kosten. Nutzen können dabei, je nach Datenlage, in quantitativer oder qualitativer Form erfasst werden. Ergänzt wird dies durch eine Einschätzung zur Verlässlichkeit der Angaben, welche die Interpretation der Ergebnisse unterstützen soll. Die dritte Kategorie bilden Kriterien zur Beurteilung der Maßnahme, die über die reine Kosten-Nutzen-Betrachtung hinaus gehen: etwa die zeitliche Dimension der Anpassungswirkung (wann müssen Maßnahmen umgesetzt werden, wie lange benötigen sie nach der Umsetzung bis die volle Wirkung erreicht ist, und wie flexibel sind die Maßnahmen umzusetzen), sowie die räumliche Reichweite (lokal bis national), ihre Anreizwirkung und die gesellschaftliche und politische Akzeptanz. Die Beurteilungskriterien erlauben damit eine Einschätzung zur Relevanz der Anpassungsmaßnahme, eine Einschätzung zur Effektivität, der Mitnahmeeffekte bzw. der lokalen Reichweite der Maßnahme. Weiterhin werden die Akzeptanz und die Flexibilität einer Maßnahme sowie die Wechselwirkungen mit anderen Anpassungsmaßnahmen beurteilt.

Dieses Instrumentarium für sektorübergreifende Analyse der Kosten und des Nutzens von Anpassungsmaßnahmen wurde in der Folge auf 28 Anpassungsmaßnahmen aus den Handlungsfeldern der DAS angewendet. Damit wurde einerseits das Instrumentarium erprobt und andererseits die Datenbasis für die Kosten-Nutzen-Berechnung von Anpassungsmaßnahmen in Deutschland erweitert, u.a. durch die Aufbereitung von Daten aus vergleichbaren Untersuchungen. Zu diesem Zweck wurden Daten aus anderen Ländern bzw. angrenzenden Themenfeldern – sofern sinnvoll möglich – auf die spezifischen Fragestellungen der Anpassung in Deutschland übertragen, bzw. Daten aus regionalen Fallbeispielen auf die Bundesebene extrapoliert. Die Ergebnisse liefern so erste Anhaltspunkte für eine sektor- und handlungsfeldübergreifende Priorisierung von Maßnahmen.

## Gruppierung der Anpassungsmaßnahmen nach betrachteten Klimaänderungen

Bereits für die hier untersuchten 28 Maßnahmen wurde deutlich, dass die Datenbasis für die Analyse sehr uneinheitlich und insgesamt lückenhaft ist. Die Analyse wurde deshalb ausgeweitet auf Literatur, die sich nicht auf Klimawandelanpassung bezieht, und durch Experteninterviews ergänzt.

Es zeigt sich, dass fast die Hälfte der untersuchten Maßnahmen hitzebedingte Auswirkungen des Klimawandels behandeln, sowohl durch erhöhte Durchschnittstemperaturen als auch häufigere oder intensivere Hitzewellen. Dieser hohe Anteil der temperaturbezogenen Anpassungsmaßnahmen erklärt sich u.a. daraus, dass die Prognose der erwarteten Folgen des Klimawandels für Änderungen der Durchschnittstemperatur mit größerer Sicherheit vorhergesagt werden kann als andere Klimafolgen.

Zwölf Maßnahmen zielen auf die Auswirkungen von Extremwettereignissen wie Stürmen und Starkniederschlägen ab. Hierunter fallen Maßnahmen der Handlungsfelder Wasserwirtschaft und Küstenschutz, Finanzwirtschaft, Bevölkerungsschutz und aus dem Bereich Boden. Während einige Maßnahmen alle Arten von Extremwettereignissen abdecken (z.B. Bevölkerungsschutz), zielen andere nur auf eine bestimmte Gruppe von Extremwetterereignissen ab (wie etwa Regenüberlaufbecken für Starkregenereignisse).

Drei Maßnahmen – aus dem Handlungsfeld Landwirtschaft und Wasserwirtschaft – zielen auf Trockenheit und Niedrigwasser ab. Hier ist die Betroffenheit regional im Bundesgebiet sehr unterschiedlich.

Eine Maßnahme zum Küstenschutz dient der Anpassung an einen steigenden Meeresspiegels.

Drei Maßnahmen dienen allgemein der Stärkung resilienter Strukturen gegen die Auswirkungen des Klimawandels und decken somit eine breite Palette möglicher Klimafolgen ab. Darunter fallen zwei Maßnahmen zur Informationsübermittlung und Sensibilisierung und eine Maßnahme zur Vernetzung von Naturschutzgebieten zum Schutz der biologischen Vielfalt und allgemein zur Stärkung der Resilienz von Ökosystemen gegenüber Klimaveränderungen.

## Gruppierung der Anpassungsmaßnahmen nach Zuständigkeit

Bei der Durchführung und Finanzierung der untersuchten Anpassungsmaßnahmen kann unterschieden werden, ob die Maßnahme vollständig öffentlich, teilweise öffentlich und privat oder vollständig privat durchgeführt und finanziert wird. Maßnahmen, die vollständig durch die öffentliche Hand umgesetzt und finanziert werden, finden sich vor allem in den Handlungsfeldern, die einen absoluten Schutzgedanken wie die öffentliche Sicherheit und die Gesundheit der Bevölkerung abdecken. Ebenfalls in diese Kategorie fallen solche Maßnahmen, die der Anpassung und dem Schutz von öffentlicher Infrastruktur dienen, sofern diese durch öffentliche Träger finanziert und unterhalten wird. Hier sind vor allem die Verkehrsinfrastruktur und der Hochwasserschutz bzw. die kommunalen Wasserwirtschaftsunternehmen zu nennen. Auch die Anpassung in der Raumplanung stellt eine (überwiegend) öffentliche Maßnahme dar, die aber durch private Aktivitäten ergänzt werden kann.

Dies führt zur zweiten Gruppe der Maßnahmen, die im Wesentlichen von privaten Akteuren durchgeführt, aber von der öffentlichen Hand unterstützt werden sollten. Dies trifft auf Maßnahmen zu, die zwar gesamtwirtschaftlich sinnvoll sind, sich jedoch kurzfristig für die privaten Akteure nicht finanziell lohnen und somit durch Förderprogramme oder Anschubfinanzierung unterstützen werden sollten. Eine Weitergabe der höheren Kosten an die Kunden oder Konsumenten ist bei diesen Maßnahmen oft nicht realisierbar, z.B. aufgrund eines hohen internationalen Wettbewerbsdrucks. Solche Maßnahmen liegen etwa im Bereich der Landwirtschaft bzw. Boden, wo durch angepasste Bearbeitungsmethoden oder Pflanzensorten zu Beginn mit Ertragsrückgängen zu rechnen ist. Für weitere Maßnahmen sollen bewusst Anreize durch öffentliche Förderprogramme gesetzt werden, u.a. um praktische Erfahrungen zu sammeln und die öffentliche Akzeptanz zu erhöhen. Bei „Grünen Dächern“ erfolgen z.B. zurzeit Förderungen, obwohl die Maßnahme durchaus auch ohne finanzielle Zuwendung durch die öffentliche Hand wirtschaftlich ist. Darüber hinaus sind in dieser Gruppe Kooperationslösungen zu nennen, die eine gemeinsame Umsetzung z.B. in der Versicherungswirtschaft als Ziel haben. Die Rolle der öffentlichen Hand kann hier auch darin bestehen, die bestehenden Anreizstrukturen so zu verändern, dass die Akteure von sich aus Anpassungsmaßnahmen ergreifen – etwa im Bereich der Landwirtschaft oder Fischerei, bei denen das Verhalten der Akteure stark von Subventionen und anderen staatlichen Zahlungen beeinflusst ist.

Die dritte Gruppe stellen Maßnahmen dar, bei denen es auch ohne Förderung durch die öffentliche Hand ein starkes Eigeninteresse der betroffenen Akteure gibt; dementsprechend werden diese nahezu vollständig von privaten Akteuren durchgeführt. Dies betrifft etwa Maßnahmen an privaten Gebäuden (u.a. Wohn-, Bürogebäude), sowie die meisten Maßnahmen aus dem Bereich Industrie und Gewerbe. Ebenfalls hier zu nennen ist die Energiewirtschaft, die Maßnahme ergreifen muss, um auch unter veränderten Klimabedingungen eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten. Die dabei entstehenden Kosten, etwa für die Anpassung der Infrastruktur, können im Prinzip an Kunden und private Investoren überwälzt werden. Die Rolle der öffentlichen Hand beschränkt sich darauf, die Anforderungen (z.B. über Normen und Standards) festzulegen, denen bspw. Gebäude und Infrastruktur genügen müssen.

Eine Aufgabe der öffentlichen Hand, die in allen drei Gruppen von Maßnahmen eine Rolle spielt, ist die Sensibilisierung der betroffenen Akteure für die Erfordernisse der Anpassung, die Bereitstellung von Informationen über die Anpassungserfordernisse und –möglichkeiten, und die Förderung der Forschung im Bereich Anpassung. In all diesen Fällen ist ein Beitrag der öffentlichen Hand daher sinnvoll und gerechtfertigt, da Hemmnisse verschiedener Art dazu führen können, dass die betroffenen Akteure sich nicht aus eigenem Antrieb ausreichend und rechtzeitig auf die Veränderungen durch den Klimawandel einstellen. Solche Hemmnisse sind bspw. die Transaktionskosten (Zeitaufwand) für die Beschaffung von Informationen über die Folgen des Klimawandels oder die Tatsache, dass Forschungsergebnisse ein öffentliches Gut darstellen. Daher sollten die Ergebnisse staatlich finanzierter Klima- und Klimaanpassungsforschung möglichst auch frei verfügbar gemacht werden.

### Gruppierung der Anpassungsmaßnahmen nach Kosten-Nutzen-Ergebnissen

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Berechnungen für die untersuchten Maßnahmen. Die Informationen werden ergänzt durch

eine qualitative Einschätzung der Unsicherheit der Kosten-Nutzen-Schätzung, die anhand der Datenbasis bzw. Berechnungsmethode vorgenommen wurde. Neben Kosten, Nutzen und Unsicherheiten bei der Berechnung ist zur ersten Orientierung auch der Zeitpunkt angegeben, ab dem die Maßnahmen aufgrund des veränderten Klimas wirksam werden.

**Tabelle 83: Übersicht der Kosten-Nutzen-Betrachtung der untersuchten Anpassungsmaßnahmen**

| Handlungsfeld/ Maßnahme | Zielzeit-punkt | Szenario | Nutzen (Mio. Euro /Jahr) | Kosten (Mio. Euro /Jahr) | Nutzen-Kosten-Verhältnis | Unsicher-heit der Schät-zung |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Industrie und Gewerbe** | | | | | | |
| **Informationstools für Anpassung von Unternehmen** | Ab sofort | - | 0,5 bis 6,0 | 0,39 | 1,26 : 1 bis 15,3 : 1 | Hoch |
| **Vermeidung hitzebedingter Produktivitätseinbußen** | 2050 | A2 | 7400 (0,19% BIP) | 1145 (0,03% BIP) | 7,1 : 1 (mind. 3 : 1) | Mittel |
| **Bauwirtschaft** | | | | | | |
| **Vermeidung hitzebeding-ter Gesundheitsgefahren im Wohnungsbau** | 2050 | A2 | 60 bis 200 (0,003 bis 0,01% BIP) | 321 bis 458 (0,014 bis 0,02% BIP) | 0,13 : 1 bis 0,62 : 1 | Hoch |
| | 2100 | A2 | 0,06 bis 0,08% BIP | 0,04 bis 0,06% BIP | 1 : 1 bis 2 : 1 | Hoch |
| **Schutz von Gebäuden vor Stürmen** | 2100 | A2 | 2100 bis 5250 (0,08 bis 0,2% BIP) | 1050 bis 1570 (0,04 bis 0,06% BIP) | 1,3 : 1 bis 5 : 1 | Sehr hoch |
| **Wasserwirtschaft/Küsten schutz** | | | | | | |
| **Vermeidung von Abwassereinleitung in die Natur mittels Regenüberlaufbecken** | 2085 | A1B | 34,4 | 93,9 | 0,33 : 1[a] (je nach Niederschlag 0,19 : 1 bis 0,44 : 1) | Mittel |
| **Deicherhöhung und Sandvorspülung im Küstenschutz** | 2085 | A2 | 272 | 110,7 | 2,5 : 1 (je nach Szenario bis 6 : 1) | Mittel |
| **Anpassung der Kläran-lagenablaufqualität an die reduzierte Wasserführung von Gewässern** | 2050 | B2 | <113,4 (vermutlich deutlich niedriger) | 145,9 | <0,78 : 1 (je nach Niedrigwasser 2,09 : 1 bis 0,68 : 1) | Hoch (bes. Nutzen) |
| **Verkehr** | | | | | | |
| **Hitzeresistentere Straßenbeläge** | Ab sofort | - | 36 bis 75 | 10 bis 40 | 0,9 : 1 bis 7,5 : 1 | Mittel |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Robustere Schieneninfrastruktur** | 2050 | B1 – A1F1 | 20,6 bis 22,2 | 25 bis 60 | 0,3 : 1 bis 0,9 : 1 | Hoch |
| **Wetterinformationssystem Transportwirtschaft** | Ab sofort | | Mind. 3,8 | 4,3 bis 8,6 | Circa 1 : 1 | Sehr hoch |
| **Raumplanung** | | | | | | |
| **Freihaltung von Frischluftschneisen (Fallbeispiel Stuttgart)** | 2050 | - | 0,53 bis 1,05 | 0,9 | 0,6 : 1 bis 1,2 : 1 | Hoch |
| **Gründächer (Fallbeispiel Düsseldorf)** | 2050 | - | 4,8 bis 14 | 5,7 | 0,7 : 1 bis 14 : 1 | Mittel |
| **Hochwasserschutz: Vorsorgende Raumplanung und Vergleich mit technischen Maßnahmen** | Betrachtungszeitraum 2015-65 | - | Gesamter Zeitraum Vorsorge 8,2 – 12,8 Technische Maßnahmen: 8,2 – 12,7 | Gesamter Zeitraum Vorsorge 2,9 – 3,4 Technische Maßnahmen: 3,02 – 3,04: | Vorsorge: 2,4 : 1 bis 4,4 : 1 Technische Maßnahme: 2,7 : 1 bis 4,1 : 1 | Hoch |
| **Finanzwirtschaft** | | | | | | |
| **Neue Versicherungsprodukte – Elementarschaden-versicherungspflicht** | Ab sofort | - | k.A. | 450 bis 900 | k.A. | Hoch |
| **Kooperationslösung Staat und Versicherungswirtschaft** | Ab sofort | - | k.A. | k.A. | k.A. | - |
| **Gesundheit** | | | | | | |
| **Hitzewarnsystem** | Ab sofort | A2 | 400 bis 2.500 | 5 | 80 : 1 bis 500 : 1 | Mittel |
| **Kühlung von Krankenhäusern** | 2050 | A2 | 188 bis 274 | 100 bis 475 | 0,4 : 1 bis 2,7 : 1 | Mittel |
| **Boden** | | | | | | |
| **Bodenschonende Bewirtschaftungs methoden** | Ab sofort | - | ab 80 €/ha | 260 €/ha | 0,3:1[b] | Sehr Hoch |
| **Biologische Vielfalt** | | | | | | |
| **Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung** | Ab sofort | - | 1.600 bis 2.900 | 135.000 | 0,01 : 1 bis 0,02 : 1 | Sehr Hoch |
| **Renaturierung von Auenlandschaften** | Ab sofort (2011-2100) | - | Gesamter Zeitraum: 21 bis 46 | Gesamter Zeitraum: 13,7 bis 18 | 1,2 :1 bis 3,4 : 1 | Hoch |
| **Landwirtschaft** | | | | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen** | 2100 | B2-A2 | 75 bis 366 | 382 bis 455 | 0,2 : 1 bis 1 : 1 | Mittel |
| **Einsatz von angepassten Pflanzensorten** | 2100 | B2-A2 | max. 165 | 0,24 | max. 680 : 1 | Hoch |
| **Energie** | | | | | | |
| **Auslegung des Stromleitungsnetzes** | 2050 | - | 10 bis 220 | 900 bis 1.000 | 0,01 : 1 bis 0,24 : 1 | Hoch |
| **Kühlung von thermischen Kraftwerken** | Ab sofort | - | 10 - 20 | 4 bis 8 | 1,3 : 1 bis 5 : 1 | Mittel |
| **Tourismus** | | | | | | |
| **Präparierung der Pisten (Fallbeispiel Bayern)** | Ab sofort | - | 850 bis 1.700 | 15 bis 30 | 28 : 1 bis 114 : 1 | Hoch |
| **Sommertourismus (Radwegenetz)** | Ab sofort | - | 1,5 bis 3 | 1 bis 3,4 | 0,4 : 1 bis 3 : 1 | Hoch |
| **Bevölkerungsschutz** | | | | | | |
| **Katastrophenschutzübung** | Ab sofort | - | Teil der Schadens-kosten | 1,4 | geringe Kosten zu Nutzen | Mittel |
| **Katastrophenschutzpläne** | Ab sofort | - | Teil der Schadens-kosten | 0,44 bis 0,9 | geringe Kosten zu Nutzen | Hoch |

[a] Da unklar ist, ob und wann es tatsächlich zu einem klimabedingten Anstieg der Intensität von Starkniederschlägen kommt, wurde hier ein solcher Anstieg angenommen und die Kosten-Nutzen-Analyse entsprechend durchgeführt.

[b] Bei der konservierenden Bodenbearbeitung sind wichtige Nutzenkomponenten (mangels Quantifizierbarkeit) nicht einbezogen. Darüber hinaus erfolgt eher eine Überschätzung der Kosten, so dass das tatsächliche Nutzen-Kosten-Verhältnis deutlich höher ausfällt.

Zwischen den untersuchten Maßnahmen zeigen sich sehr starke Unterschiede. Die Kosten-Nutzen-Verhältnisse schwanken zwischen sehr günstigen Ergebnissen für z.B. Hitzewarnsystem und angepasste Pflanzensorten, bis zu sehr ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnissen, u.a. bei der Anpassung des Stromleitungsnetzes. Bei der Einschätzung der jeweiligen Maßnahmen auf Basis der berechneten Kosten und Nutzen ist allerdings Vorsicht geboten: so können bei vielen Maßnahmen die Wirkungen nur zum Teil monetarisiert werden. Bei der Darstellung der einzelnen Maßnahmen ist daher zusätzlich erwähnt, welche qualitativen Aspekte bei einer Beurteilung zu berücksichtigen sind. Ebenfalls gehen aufgrund der unzureichenden Datenlage viele Annahmen in die Berechnung ein. In dieser Studie wurden diese Annahmen und Schätzungen so transparent wie möglich dargestellt, so dass deutlich wird, auf welcher Datengrundlage die Analysen aufbauen, welche Probleme bei der Berechnung bestehen, an welchen Stellen Annahmen nötig waren, um Datenlücken zu überbrücken und wie die Autoren zu diesen Annahmen gelangt sind.

Eine weitere Übersicht in der folgenden Tabelle gruppiert die Maßnahmen nach positivem, ausgeglichenem und negativem Kosten-Nutzen-Verhältnis. Allerdings ist bei der Diskussion der Maßnahmen und einer etwaigen Priorisierung bzw. Definition von Maßnahmenbündeln zu berücksichtigen, dass nicht alle einzelnen Maßnahmen in einem Wettbewerb zueinander stehen. So kann es Maßnahmen geben, die für sich genommen ungünstig sind, die aber andere Maßnahmen in ihrer Wirkung unterstützen oder deren Durchführung erleichtern, und sich daher mit anderen zu einem effizienten Gesamtpaket verbinden lassen.

**Abbildung 14: Anpassungsmaßnahmen nach Kosten-Nutzen-Verhältnis gruppiert**

| Positives Kosten-Nutzen-Verhältnis | Ausgeglichenes Kosten-Nutzen-Verhältnis | Negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis |
|---|---|---|
| • Information für Unternehmen<br>• Klimatisierung Arbeitsräume<br>• Deicherhöhung<br>• Hitzewarnsystem<br>• Angepasste Pflanzensorten<br>• Beschneiung Pisten[a]<br>• Vorsorgende Raumplanung –Hochwasserschutz<br>• Renaturierung Auen | • Gebäudeschutz vor Stürmen<br>• Wetterinfos Verkehr<br>• Frischluftschneisen<br>• Gründächer<br>• Kühlung Krankenhäuser<br>• Bodenschutz[b]<br>• Kühlung therm. Kraftwerke<br>• Kläranlagenanpassung an Niedrigwasser<br>• Diversifizierung Tourismus<br>• Katastrophenschutzübungen[c]<br>• Katastrophenschutzpläne[c] | • Klimatisierung Wohnräume<br>• Regenüberlaufbecken<br>• Straßeninfrastruktur<br>• Schieneninfrastruktur<br>• Bewässerung Landwirtschaft<br>• Anpassung Stromleitungsnetz<br>• Aufbau Naturschutzgebiete und Vernetzung[d] |

Anmerkungen: Die Maßnahmen aus der Finanzwirtschaft wurden aufgrund ihrer nicht vorliegenden Kosten-Nutzen-Verhältnisse nicht mit in die Übersicht aufgenommen.

[a] Für die Beschneiung von Pisten wurden die negativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt nicht mit in die Betrachtung einbezogen.

[b] Die Maßnahme zur bodenschonenden Bewirtschaftungsmethode wird trotz ihres negativen berechneten Kosten-Nutzen-Verhältnisses in die Rubrik ausgeglichenes Kosten-Nutzen-Verhältnis eingeordnet, da viele Aspekte nicht monetarisiert werden konnten.

[c] Bei den Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Bevölkerungsschutz konnten bestimmte Nutzenaspekte nicht monetarisiert werden. Obwohl diese vermutlich ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis besitzen, wurden in der Übersicht die beiden Maßnahmen im Bevölkerungsschutz unter ausgeglichenes Kosten-Nutzen-Verhältnis eingeordnet.

[d] Wesentliche Nutzenaspekte gehen hier in die Nutzenberechnung nicht ein.

Infrastrukturmaßnahmen wiesen schlechtere Kosten-Nutzen-Verhältnisse auf als andere Maßnahmentypen. Tendenziell zeichnet sich ab, dass Maßnahmen im Bereich der Infrastrukturen, die mit hohen Investitions- und Instandhaltungskosten verbunden sind, ein negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis der monetarisierbaren Größen aufweisen, z.B. Verkehrsinfrastruktur und Energieinfrastruktur. Für die Anpassung der Kläranlagenleistung

an stärker ausgeprägte Niedrigwasserperioden der Einleitgewässer gilt diese Einschätzung nur deswegen nicht, weil sie sich auch unabhängig vom Klimawandel durch einen hohen Nutzen auszeichnen, indem sie den ökologischen Zustand der Küstenmeere zu verbessern helfen.

Für die beiden Anpassungsmaßnahmen im Bereich Awareness raising und Informationsvermittlung, die hier untersucht wurden, lässt sich festhalten, dass diese Maßnahmen ein mindestens ausgeglichenes Kosten-Nutzen-Verhältnis zeigen, zumal die Kosten für solche Maßnahmen relativ gering sind. Jedoch lassen sich Nutzenaspekte für diese Maßnahmen nur eingeschränkt bestimmen und sind notwendigerweise mit starken Unsicherheiten behaftet. Die untersuchten Maßnahmen der Raumplanung und des Bevölkerungsschutz zeigen positive bis ausgeglichene Kosten-Nutzen-Verhältnisse.

Maßnahmen mit positivem Kosten-Nutzen-Verhältnis empfehlen sich prinzipiell für eine Umsetzung, mit der Einschränkung dass Kosten und Nutzen z.T. mit Unsicherheiten behaftet sind. Bei einem ausgeglichenen Kosten-Nutzen-Verhältnis können verstärkt andere Kriterien in die Entscheidung eingehen, ob und ggf. wann diese umzusetzen sind, etwa deren Relevanz, Flexibilität / No-regret-Charakter oder die zeitliche Dimension. Auch bei Maßnahmen mit zunächst negativem Kosten-Nutzen-Verhältnis kann es Gründe geben, weshalb diese ggf. als Teil eines weiteren Maßnahmenbündels zu betrachten sind – etwa, wenn ungeachtet der Kosten und Nutzen eine besondere Relevanz gegeben ist, wenn erhebliche Teile des Nutzens nicht quantifiziert werden konnten, oder falls starke positive Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen zu erwarten sind. Im Folgenden wird genauer erläutert, wie diese zusätzlichen Beurteilungskriterien Eingang in eine umfassende Bewertung der Maßnahmen finden können.

### Gruppierung von Anpassungsmaßnahmen nach Regret/No-regret-Kriterium und Relevanz

Sollen in einem ersten, schnellen Überblick die wichtigsten Anpassungsmaßnahmen identifiziert werden, so sind dafür diejenigen auszuwählen, die sowohl eine hohe Relevanz aufweisen, als auch unter das Kriterium No-regret fallen, da diese für eine Umsetzung besonders in Frage kommen und je nach zeitlichen Rahmen als erste ergriffen werden sollten. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Maßnahmen nach ihrer Relevanz und No-regret/regret-Einordung aufgetragen.

**Tabelle 84: Einordnung der Maßnahmen nach Relevanz und No-regret/regret**

| | Need-to-have (absolutes Schutzgut) | Need-to-have (Sicherung Systemstabilität, Schutz kritische Infrastrukturen) | Nice-to-have |
|---|---|---|---|
| No-regret | • Grüne Dächer<br>• Bodenschutz<br>• Aufbau Naturschutzgebiete und Vernetzung<br>• Katastrophenschutz-übungen<br>• Katastrophenschutz-pläne | | • Wetterinfos Verkehr<br>• Diversifizierung Tourismus<br>• Kläranlagenanpassung an Niedrigwasser |
| Low-regret | • Deicherhöhung<br>• Klimatisierung Wohnräume<br>• Hitzewarnsysteme<br>• Renaturierung Auen | • Kooperationslösung Staat-Versicherungs-wirtschaft<br>• Straßeninfrastruktur | • Elementarschadens-versicherung<br>• Regenüberlaufbecken<br>• Klimatisierung Arbeitsräume<br>• Angepasste Pflanzensorten<br>• Informationen Unternehmen<br>• Gebäudeschutz Stürme |
| Regret | • Frischluftschneisen[a]<br>• Kühlung Krankenhäuser | • Schieneninfrastruktur | • Anpassung Stromleitungsnetz<br>• Kühlung therm. Kraftwerke<br>• Vorsorgende Raumplanung - Hochwasserschutz |
| High-regret | | | • Bewässerung Landwirtschaft<br>• Beschneiung Pisten |

[a]: Wenn weitere Nutzenkomponenten einbezogen werden können, könnte sich auch low-regret ergeben.

Aus der Tabelle geht hervor, dass sich die betrachteten Maßnahmen über das ganze Spektrum der Relevanz und Regret/no-regret-Ausprägungen verteilen. Bei den Need-to-have Maßnahmen, die auf ein absolutes Schutzgut ausgerichtet sind, liegen viele No-regret Maßnahmen vor, aber auch Low-regret und Regret-Optionen. Die untersuchten Maßnahmen, die auf die Sicherung der Systemstabilität und die kritischen Infrastrukturen abzielen, fallen unter Low- und Regret. Bei den Nice-to-have Maßnahmen gibt es Maßnahmen mit No- und Low-regret Potential, aber mehr Regret- und sogar zwei High-regret-Maßnahmen. Für eine Priorisierung kann abgeleitet werden, dass die Need-to-have Maßnahmen mit absolutem Schutzgedanken in einer gesellschaftlichen Versicherungs- und Vorsorgelogik (das Schlimmste vermeiden) auf jeden Fall verfolgt werden sollten, unabhängig davon, ob sie Regret oder No-regret Maßnahmen sind. Bei den Need-to-have Maßnahmen im Bereich der Systemstabilität sollten auf jeden Fall die Maßnahmen aus dem Low-regret Bereich weiterverfolgt werden. Die Regret und High-regret Maßnahmen wären

weiter zu prüfen. Bei den Nice-to-have Maßnahmen stellen die Maßnahmen mit Regret oder High-regret eher keine Priorität dar.

### Gruppierung der Anpassungsmaßnahmen nach zeitliche Dimension und Relevanz

Eine Verschneidung der Kriterien zeitliche Dimension, Relevanz und Kosten-Nutzen-Verhältnis kann vor allem für Maßnahmen mit ausgeglichenem Kosten-Nutzen-Verhältnis Handlungshinweise geben. Darüber hinaus ist eine zeitliche Dringlichkeit für das Ergreifen verschiedener Anpassungsmaßnahmen ersichtlich.

**Abbildung 15: Untersuchte Maßnahmen eingeteilt nach Relevanz, zeitlicher Dringlichkeit und Kosten-Nutzen-Verhältnis**

| | Need-to-have (absolutes Schutzgut) | Need-to-have (Sicherung Systemstabilität, Schutz KRITIS) | Nice-to-have |
|---|---|---|---|
| heute | + Hitzewarnsystem<br>+/- Bodenschutz<br>+/- Katastrophen-schutzübungen<br>+/- Katastrophen-schutzpläne<br>- Aufbau Naturschutz-gebiete und Vernetzung<br>+ Renaturierung Auen | - Straßeninfrastruktur<br>0 Kooperationslösung Staat-Versicherungs-wirtschaft | + Information Unternehmen<br>+ Beschneiung Pisten<br>+/- Wetterinfos Verkehr<br>+/- Diversifizierung Sommertourismus<br>+/- Kühlung therm. Kraftwerke<br>0 Elementarschadensversicherung<br>+ Vorsorgende Raumplanung – Hochwasserschutz |
| 2050 | +/- Grüne Dächer<br>+/- Frischluftschneisen<br>+/- Kühlung Krankenhäuser<br>- Klimatisierung Wohnungsbau | - Schienen-infrastruktur | +/- Kläranlagenanpassung an Niedrigwasser [a]<br>+ Klimatisierung Arbeitsräume<br>- Anpassung Stromleitungsnetz |
| 2080/2100 | + Deicherhöhung | | + Angepasste Pflanzensorten<br>+/- Gebäudeschutz Stürme<br>- Regenüberlaufbecken<br>- Bewässerung Landwirtschaft |

Anmerkung: „+“ zeigt ein positives, „+/-“ ein ausgeglichenes und „-“ ein negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis, 0 bedeutet, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht berechnet werden konnte

[a] Aus Sicht des Schutzes der Küstenmeere wäre die Anpassung schon heute angezeigt.

Die Übersicht zeigt, dass verschiedene zeitliche Dringlichkeiten in allen Relevanz-Kategorien auftreten. Es fällt auf, dass viele untersuchte Need-to-have Maßnahmen (sowohl absolutes Schutzgut als auch Schutz Systemstabilität und Schutz kritischer Infrastrukturen) bereits heute ergriffen werden sollten. Darüber hinaus ist bei allen analysierten Maßnahmen, die heute ergriffen werden sollten, nur eine Maßnahme enthalten, die ein negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist. Die meisten untersuchten Maßnahmen, die ein negatives

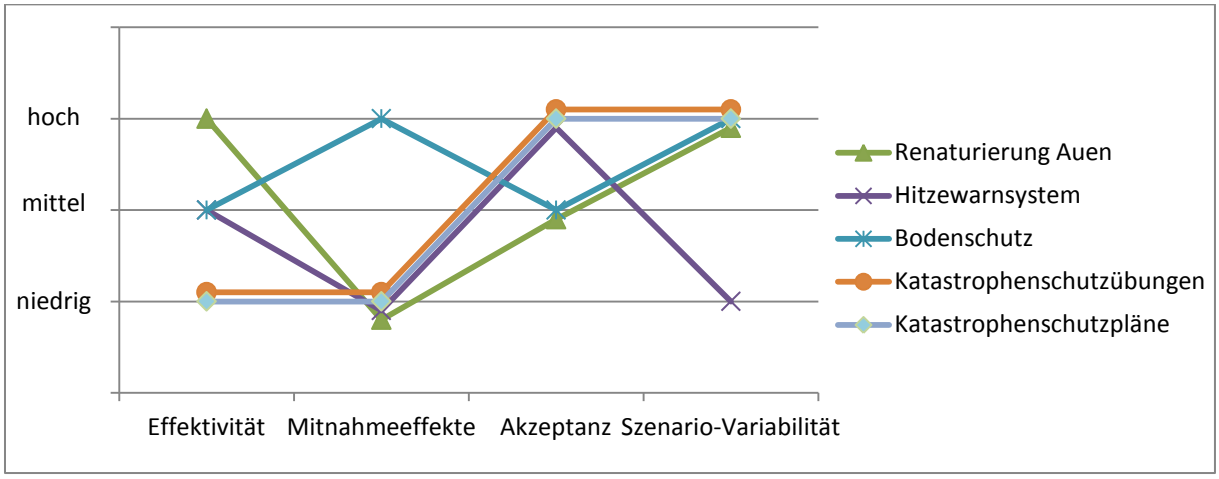
Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen, zeigen sich bei den Nice-to-have Maßnahmen. Allerdings ist vor allem bei der Diskussion der Maßnahmen mit negativem Kosten-Nutzen-Verhältnis zu beachten, ob ggf. Teile des Nutzens nicht quantifiziert werden konnten, und daher als qualitative Erwägung in die Überlegungen einfließen sollten.

Aus dieser Übersicht zeigt sich für eine weitere Priorisierung, dass die Need-to-have Maßnahmen, die eine zeitliche Dringlichkeit aufweisen, als erstes durchgeführt werden sollten. Über die Nice-to-have Maßnahmen, die heute anstehen, sollte unter Einbezug weiterer Kriterien, z.B. Kosten-Nutzen-Verhältnis entschieden werden. Darüber hinaus sollten Need-to-have Maßnahmen, die mittelfristig bzw. langfristig umgesetzt werden müssten, auch mit weiteren Kriterien betrachtet werden. Für solche Maßnahmen, bei denen einerseits der aktuelle Kenntnisstand nicht für eine hohe Dringlichkeit spricht, andererseits aber die Einschätzung ihrer Wirkung noch mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, besteht die Möglichkeit dass sich die Unsicherheit in den kommenden Jahren durch weitere Forschung verringern lässt.

### Auswertung der Anpassungsmaßnahmen nach weiteren ausgewählten Kriterien

Nach einer ersten Abschätzung nach Relevanz und zeitlicher Dimension können weitere Kriterien in einen Vergleich der Maßnahmen eingebunden werden. Für die fünf Maßnahmen, die eine hohe Relevanz (beide Need-to-have Kategorien), eine zeitliche Dringlichkeit und ein mindestens ausgeglichenes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen, sind in der nächsten Grafik nochmals weitere Kriterien aufgetragen.

**Abbildung 16: Darstellung weiterer Kriterien**




Für die Darstellung wurden die vier Kriterien Szenario-Variabilität, Akzeptanz, Mitnahmeeffekt und Effektivität ausgewählt. Von den aufgetragenen Maßnahmen zeichnen sich insbesondere die Renaturierung Auen als positiv gegenüber der der Effektivität aus. Mit mittlerer Effektivität folgen Hitzewarnsystem und Bodenschutz, und mit geringerer Effektivität: Katastrophenschutzübungen und überarbeitete Katastrophenschutzpläne.

Im Verlauf der Untersuchung wurde deutlich, dass sich einige Maßnahmen aufgrund ihrer besonderen Relevanz und der zeitlichen Charakteristik bzw. ihrem No-regret-Charakter eher für eine frühzeitige Umsetzung empfehlen, so etwa Renaturierungsmaßnahmen,

bodenschonende konservierende Bewirtschaftung, Hitzewarnsystem oder die untersuchten Maßnahmen im Bevölkerungsschutz.

Die Untersuchung zeigt somit, dass sich das Kriterienset für eine vielschichtige Betrachtung eignet. Der Vergleich von Kosten und Nutzen stellt zwar ein zentrales Kriterium dar; um aber zu beurteilen, welche Maßnahmen in welcher Reihenfolge umgesetzt werden sollten, empfiehlt es sich auch weitere Kriterien wie Relevanz, No-regret/regret und die zeitliche Dimension zu betrachten. Weitere Erkenntnisse ergeben sich aus der Kombination unterschiedlicher Kriterien, die eine inhaltliche Clusterung der verschiedenen Maßnahmen ermöglicht.

## Fazit und Ausblick

Bislang lag keine systematische Kosten-Nutzen-Analyse für die Anpassung an den Klimawandel in Deutschland vor. Diese Studie trägt dazu bei, diese Lücke zu füllen, gibt aber auch einen Einblick in die weiterhin bestehenden Unsicherheiten und Datenlücken. Das Projekt hat eine Bewertungsmethodik für eine erweiterte Kosten-Nutzen-Betrachtung entwickelt und diese auf 28 Anpassungsmaßnahmen angewendet. So hat die Studie zum einen gezeigt, dass die Methodik praktisch anwendbar ist, und zum anderen die empirische Basis für die ökonomische Bewertung von Anpassungsmaßnahmen erweitert und konsolidiert. Die Ergebnisse geben so einen Eindruck davon, welchen Mehrwert eine ökonomische Betrachtung für die Bewertung, Priorisierung und Auswahl von Anpassungsmaßnahmen bringen kann.

Bei der Analyse zeigte sich aber auch, dass die begrenzte Datenverfügbarkeit und die bestehenden Unsicherheiten über die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen einer ökonomischen Betrachtung Grenzen setzen, und z.T. starke Annahmen erfordern. Unsicherheiten bestehen insbesondere bei der Bewertung, welchen Teil der Schäden eine Anpassungsmaßnahme tatsächlich vermieden kann. Ein weiterer einschränkender Faktor sind die Grenzen der ökonomischen Bewertung im Fall nicht marktgängiger Güter (etwa Schutz der Artenvielfalt), da die Datenbasis hierfür sehr lückenhaft ist, und solche Aspekte daher oft nur durch aufwändige Einzelstudien bewertet werden können. Diese Problematik besteht jedoch grundsätzlich bei allen Kosten-Nutzen-Analysen umweltpolitischer Maßnahmen.

Die mangelnde Datenverfügbarkeit beschränkt teilweise die Zuverlässigkeit der Bewertungen, bzw. macht viele Annahmen notwendig. In einigen Fällen lassen sich Ergebnisse aus anderen Fallstudien (z.T. im Ausland) übertragen, so liegen etwa in Großbritannien und den Niederlande bereits weitergehende ökonomische Studien vor. An vielen Stellen waren dennoch Annahmen nötig, um bestehende Datenlücken zu überbrücken.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Bewertung der Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen entsteht durch den langen Zeithorizont. Im Unterschied zu anderen Teilbereichen der Umweltpolitik geht es bei der Anpassung darum, Maßnahmen über einen Zeithorizont von mehreren Jahrzehnten zu betrachten. In dieser Betrachtung überlagern sich die Klimaentwicklungen und die Anpassung daran notwendigerweise mit anderen gesellschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Veränderungen, die sich ihrerseits auf die Kosten und Nutzen auswirken. Neben der allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung, veränderten Konsumgewohnheiten, veränderten Energiepreisen und der demografischen

Entwicklung beeinflussen auch andere Politikfelder die Rahmenbedingungen, innerhalb derer Anpassungsmaßnahmen geplant werden. So steht bspw. das Energiesystem (Erzeugung und Verteilung) in Deutschland in den nächsten Jahren vor einem umfassenden Umbau, der sich nur bedingt vorhersehen lässt. Die Frage, wie das deutsche Stromleitungsnetz auf kommende Extremwetterereignisse vorbereitet werden kann, setzt jedoch zunächst einmal Annahmen voraus, wie dieses Netz in den nächsten Jahrzehnten aussehen wird. Gleiches gilt für den Kühlwasserbedarf thermischer Kraftwerke. Solche Entwicklungen wurden, soweit wie möglich, in die Analysen einbezogen, übersteigen aber in ihrer detaillierten Bewertung den Rahmen der vorliegenden Studie.

Die Analysen werden weiterhin erschwert durch starke Bandbreiten der Klimavorhersagen. Besonders für Niederschläge variieren die bisherigen Vorhersagen zwischen einem Rückgang und einer deutlichen Zunahme. Da die Unsicherheiten der Klimaauswirkungen eine unvermeidliche Bedingung für die Planung von Anpassungsmaßnahmen sind, wurde versucht die Bandbreite der Annahmen abzubilden. Zusätzlich wurde das Kriterium der Szenario-Variabilität der Maßnahmen eingeführt, das beschreibt, ob eine Anpassungsmaßnahmen auch in verschiedenen Klimaszenarien einen Anpassungseffekt zeigt, bzw. wie sich die Variabilität auf die Bewertung der Maßnahme auswirkt. Trotzdem könnten die vorliegenden Berechnungen mit Ergebnissen aus neuen Klimaprojektionen noch verbessert werden.

Das eingesetzte Kriterienset mit einem multikriteriellen Ansatz, der neben den reinen Kosten- und Nutzengrößen auch weitere Kategorien wie Relevanz, zeitliche Dimension oder No-regret/regret, einschließt, hat sich bei den Analysen bewährt. Wie oben beschrieben, ist es bei der Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen unabdinglich weitere Entscheidungskriterien einzubeziehen, dies gilt sowohl für öffentliche Institutionen als auch für private Akteure. Die Abwägung dieser Kriterien muss letztlich in einem politischen Prozess unter Einbindung der betroffenen Stakeholder erfolgen; eine wie auch immer geartete Bewertung kann aber immerhin eine konsistente Grundlage für diesen Diskussionsprozess schaffen.

Bei der Studie wurde auch deutlich, dass ein weiterer Bedarf für detaillierte Kosten-Nutzen-Bewertungen besteht. Für einige Handlungsfelder, z.B. in Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft, sind die Datenbasis und die Wirkungszusammenhänge momentan noch nicht ausreichend, um die Maßnahmen detailliert zu beurteilen.

Daher sind weitere Untersuchungen gerade in Handlungsfeldern nötig, bei denen die Wirkungen zwar prinzipiell gut monetär bewertet werden können, aber keine ausreichenden deutschlandweiten Daten vorliegen, so z.B. im Handlungsfeld Energie, Wasserversorgung oder Landwirtschaft. Darüber hinaus können neue Ansätze zur Bewertung von Ökosystemdienstleistungen die Betrachtungen im Bereich Biodiversität weiter vorantreiben. Auch im Bereich der Raumplanung konnten in der Studie z.B. Ansatzpunkte für eine Bewertung von Maßnahmen aufgezeigt werden; diese konnte jedoch nur für lokale Fallstudie durchgeführt werden. Hier besteht weiterer Bedarf, die Bewertung durch weitere lokale Fallbeispiele zu untermauern, um auch zu überregionalen, allgemeingültigen Schlussfolgerungen zu gelangen. Aber gerade raumplanerische Studien sind auch auf lokaler und regionaler Ebene sehr sinnvoll, da sie lokale Aspekte einbeziehen, die sich kaum sinnvoll auf nationale Ebene aggregieren lassen. Das in diese Studie vorgestellte Vorgehen der multikriteriellen Analyse kann dabei als Richtschnur genommen werden, um sowohl eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Fallstudien als auch die Übertragbarkeit auf die nationale Eben zu ermöglichen.

# 5 Referenzen


Ackerman F.; Stanton, E. (2008): The Cost of Climate Change. What We'll Pay if Global Warming Continues Unchecked. New York: Natural Resources Defense Council.

Ackerman, F.; Stanton, E. (2006): Climate Change – the Costs of Inaction. Global Development and Environment Institute, Tufts University, Medford, MA. Available at http://www.foe.co.uk/resource/reports/econ_costs_cc.pdf.

Adams R. et al. 2004: "The Value of Snow and Snow Information Services." Report Pre-pared for NOAA's National Operational Hydrological Remote Sensing Center, Chanhassen.

Aebischer, B. (2006): Die Bedeutung der Sommerkühlung für die Elektrizitätsnachfrage in der Schweiz. Forum-Energie-Zürich, Mehr Kühlung mit weniger Energie, Zürich, 14. März 2006, Available at http://www.cepe.ethz.ch/publications/Aebischer_Sommerkuehlung_Forum-ZH_14-3-06.pdf.

Agrawala, S. (Ed.) (2007): Climate Change in the European Alps. Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management. OECD, Paris. Available at http://www.sourceoecd.org/Präsentation environment/9264031685.

Ahmels, P. (2009): Ansätze zur Anpassung der Elektrizitätsverteilung. Präsentation Stakeholder-Dialog, Umweltbundesamt, Dessau, 30.6.2009.

Allianz (2009): 100 Tage Kampagne „Voraus denken – elementar versichern" in Bayern, Presse-mitteilung der Allianz Deutschland AG vom 26.5.2009, Available at www.allianzdeutschland.de.

Amt für Umweltschutz Stuttgart (2010): Der Klimawandel – Herausforderung für die Stadtklimatologie. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 3/2010.

Andersen, H. E. (2003): Hydrology, Nutrient Process and Vegetation in Floodplain Wetlands. National Environmental Research Institut, Denmark.

Ansel, W. (2008): Gründach-Förderung in Deutschland - Bewährte Verfahren und aktuelle Trends, in: Kommunalwirtschaft, 07-08/2008, S. 495-496.

ATV (Abwassertechnische Vereinigung) (1997): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten. Regelwerk Abwasser-Abfall, Arbeitsblatt A 131, St. Augustin: ATV

Baker, C.J., Chapman, L., Quinn, A.; K. Dobney (2010): Climate change and the railway industry: a review, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Special Issue Paper, S. 519-528.

Banting, D., Doshi, H., Li, J.; P. Missios (2005): Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto, im Auftrag von City of Toronto und Ontario Centres of Excellence.

BAST, Bundesanstalt für Straßenwesen (2010): Positionspapier der Arbeitsgruppe Klima.

Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011): Kaufwerte landwirtschaftlicher Grundstücke in Bayern 2010. Statistische Berichte, München.

Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Kreise, Bruttoinlandsprodukt/Bruttowertschöpfung, Jahre. Available at https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online;jsessionid=A7E8B389D52768F4C43024E1CDD9851C?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=82711-002&levelindex=1&levelid=1299080892055&index=2.

Bayrische Staatsregierung (2010): Voraus denken – elementar versichern. Information für Eigentümer und Mieter zur Absicherung vor Naturgefahren durch Versicherungen, Bayrische Staatsministerien für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie sowie für Umwelt und Gesundheit, Version März 2010, München.

Bayrisches Landesamt für Umwelt (2009): UmweltWissen: Beschneiungsanlagen und Kunstschnee. Augsburg.

BBK (2011): Übungsserie LÜKEX. Available at http://www.denis.bund.de/luekex/.

BdEW (2010a): BDEW-Fakten: Deutsches Stromnetz ist 1,78 Millionen Kilometer lang. Berlin, Pressemitteilung vom 22.März 2010.

BdEW (2010b): Energiemarkt Deutschland. Zahlen und Fakten zur Gas-, Strom-.und Fernwärmeversorgung. Berlin.

Becker, P. (2011): Gefahren durch extreme Niederschläge werden ab Mitte des Jahrhunderts deutlich zunehmen. Gemeinsame Pressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Umweltbundesamtes (UBA), Technischen Hilfswerks (THW) und Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) am 15. Februar 2011 in Berlin. Available at http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_presse&T98029gsbDocumentPath=Content%2FPresse%2FPressekonferenzen%2F2011%2FPK__15__02__11%2FPressekonferenz.html.

Berry, P. (2007): Adaptation Options on Natural Ecosystems. A report to the UNFCCC Secretariat Financial and Technical Support Division. Available at http://unfccc.int/cooperation_and_support/financial_mechanism/financial_mechanism_gef/items/4054.php.

Berry, P. et al. (2006): Biodiversity. Task 3 Report –Climate Change Impacts and Adaptation: Cross-Regional Research Programme, Project E – Quantify the cost of future impacts. Metroeconomica Limited for DEFRA.

BfN (2008): Daten zur Natur 2008. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

BfN (2011a): Naturschutzgebiete. Available at http://www.bfn.de/0308_nsg.html.

BfN (2011b): Nationalparke. Available at http://www.bfn.de/0308_nlp.html.

BfN (2011c): Biosphärenreservate. Available at http://www.bfn.de/0308_bios.html.

Bickel, P. et al. (2005): HEATCO: Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment, Deliverable 5 – Proposal for harmonised guidelines.

BMU (2007a): Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt. Beschlossen am 7. November 2007, Berlin.

BMU (2007b): Forsa-Umfrage zu "Biologische Vielfalt": Die Natur ist den Deutschen ausgesprochen wichtig. Available at http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/forsa_umfrage_biodiversitaet.pdf.

BMVBS (2010): Internetauftritt der Fahrradregion Ostallgäu. Available at http://www.nationaler-radverkehrsplan.de/praxisbeispiele/anzeige.phtml?id=2016#handlungsfeld.

Böhm, E.; Hillenbrand, T.; Liebert, J.; Schleich, J.; Walz, R. (2002): Kosten-Wirksamkeitsanalyse von nachhaltigen Maßnahmen im Gewässerschutz. Herausgegeben vom Umweltbundesamt, UBA-Texte 12-02, Berlin.

BOXER – Infodienst (2003): Spitzenstrom an Amsterdamer Börse weit teurer als Solarstrom. Pressemeldung 12.08.2003, Available at www.boxer99.de.

Braat, L.; ten Brink, P. (2008): The Cost of Policy Inaction (COPI). The case of not meeting the 2010 biodiversity target. Wageningen/Brussels.

Brand-Sassen, H. (2004): Bodenschutz in der deutschen Landwirtschaft – Stand und Verbesserungsmöglichkeiten. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen. Available at http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2004/brandt-sassen/brandt-sassen.pdf.

Brandt, K. (2007): Die ökonomische Bewertung des Stadtklimas am Beispiel der Stadt Essen, Essener Ökologische Schriften, Band 25 (2007), Westarp-Wissenschaften.

Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.

Bronstert, M. (Hrsg) (2004): Möglichkeiten zur Nutzung des Hochwasserrisikos durch Nutzung von Flutpoldern. an Havel und Oder: Schlussbericht zum BMBF-Projekt im Rahmen des Vorhabens „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel". Potsdam.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009): Verkehrsinvestitionsbericht 2009. Drucksache des Deutschen Bundestages 17/444.

BWK (2006): Wasserwirtschaftliche Verhältnisse im Einzugsgebiet des Aland. Available at http://www.bwk-lsa.de/download/FachexkursionAland.pdf.

BZ (2010): Hitze: Werden Kraftwerke abgeschaltet? BZ, 13.07.2010, Available at http://www.bz-berlin.de/aktuell/deutschland/hitze-werden-kraftwerke-abgeschaltet-article918371.html.

Ciscar, J.-C. (Ed.) (2009): Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project. 2009. Joint Research Centre Scientific and Technical Report, Available at http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=2879.

Costanza, R.; R. d'Arge; R. de Groot; S. Farber; M. Grasso; B. Hannon; K. Limburg; S. Naeem; R.V. O'Neill; J. Paruelo; R.G. Raskin; P. Sutton; M. van den Belt (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital. in: Nature 387, p. 253–260.

Dehnhardt, A. (2002): Der ökonomische Wert der Elbe als Nährstoffsenke: Die indirekte Bewertung ökologischer Leistungen. In: Dehnhardt, A.; Meyerhoff, J.: Nachhaltige Entwicklung der Stromlandschaft Elbe. Nutzen und Kosten der Wiedergewinnung und Renaturierung von Überschwemmungsauen. Kiel.

Dehnhardt, A., Drünkler, D., Hirschfeld, J., Petschow, U., Engel, H., Hammer, M. (2008): Kosten-Nutzen-Analyse von Hochwasserschutzmaßnahmen, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 204 21 212, UBA-FB 001169.

Dena (2010): dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin. Available at http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien___Umfragen/Ergebniszusammenfassung_dena-Netzstudie.pdf.

DeStatis (2009): Umwelt: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007. Fachserie 19, Reihe 2.1 des Statistischen Bundesamtes, Wiesbaden

DeStatis (2009): Umwelt: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007. Fachserie 19, Reihe 2.1 des Statistischen Bundesamtes, Wiesbaden

DeStatis (2010): Statistisches Jahrbuch 2010 für die Bundesrepublik Deutschland mit “Internationalen Übersichten”. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

Deutscher Wetterdienst (2010): Jahresbericht 2009.

Diez, K.; Lennerts, K. (2010): Benchmarking im Krankenhaus – Schwerpunkte Energie und Instandhaltung. Tagungsband Facility Management Messe und Kongress Frankfurt am Main, März 2010, S. 377-385. Available at http://www.tmb.kit.edu/download/Benchmarking_im_Krankenhaus_-_Schwerpunkte_Energie_und_Instandhaltung.pdf.

Dister, E. (1985): Auelebensräume und Retentionsfunktion. – In: Die Zukunft der ostbayerischen Donaulandschaft. Laufener Seminarbeiträge 3/85, S.74 - 90.

DMG (2007): Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zur Klimaproblematik. Available at http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/stellungnahmen/Klimastatement_dmg_2007_09_10_c2.pdf.

Dobney K. (2010): Quantifying the effects of an increasingly warmer climate with a view to improving the resilience of the GB railway network: Is a new stressing regime the answer?, PhD Thesis, University of Birmingham.

Dobney, K., Baker, C.J., Chapman, L. und A. Quinn (2010): The future cost to the United Kingdom’s railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Rail and Rapid Transit, Vol. 224, p. 25-34.

DUH (2011): Modellprojekt Lenzener Elbtalaue. Ökologischer Hochwasserschutz wird wahr. Available at http://www.duh.de/1043.html.

Dunkelberg, E.; Hirschl, B.; Hoffmann, E. (2009): Ergebnis des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Energiewirtschaft. 30.06.2011 in Dessau, Available at http://www.anpassung.net/nn_701074/DE/Anpassungsstrategie/Veranstaltungen/Dialoge_20zur_20Klimaanpassung/0907_20Energiewirtschaft/Auswertung,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Auswertung.pdf.

Ebi, K.L. et al. (2004) Heat Watch/Warning systems save lives: Estimated Costs and Benefits for Philadelphia 1995–98. In: Bulletin of the American Meteorological Society, August 2004, p. 1067-1073.

Ecologic, Infras (2009): Klimawandel: Welche Belastungen entstehen für die Tragfähigkeit der Öffentlichen Finanzen?, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Finanzen BMF, Berlin.

Ecoplan (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Projektbericht für das Schweizerische Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Energie (BFE) vom 31.7.2007

EEA (European Environmental Agency) (2008): Impacts of Europe's changing climate — 2008 indicator-based assessment. EEA report no, 4/2008.

Elsasser, H.; Messerli, P. (2001): The Vulnerability of the Snow Industry in the Swiss Alps. In: Mountain Research and Development, Vol 21, No 4, Nov 2001, p. 335–339.

Epperlein, J. (2008): 10 Jahre GKB - Aktuelle Trends in der Bodenbearbeitung. Plädoyer für ein Umdenken mit der Ressource Boden. Präsentation auf der „Ackerbautagung“ Bernburg/Iden 26.11/27.11.2008.

EU (2011): Länder in Europa. Available at ec.europa.eu/publications/ booklets/others/.../countries_de.doc

Europäische Kommission (2011): Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020. COM(2011) 244, Brüssel.

Eurostat (2011a): Total population. Available at http://epp.eurostat.ec.europa.eu/ tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tps00001

Eurostat (2011b): Population projections. Available at http://epp.eurostat.ec.europa.eu/ tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tps00002.

Ewringmann, D. (2002): Die Emanzipation der Abwasserabgabe vom Ordnungsrecht im Rahmen der EG-Wasserrahmenrichtlinie und eines Umweltgesetzbuches, in: Bohne, E. (Hrsg.): Perspektiven für ein Umweltgesetzbuch, Berlin 2002, 265-293.

Finanztest (2004): Geld nach der Flut, Elementarschadenversicherung, Finanztest 5/2004, 74–75.

Finanztest (2007): Ruhe nach dem Sturm, Wohngebäude- und Elementarschadenschutz, Finanztest 12/2007, 40–47.

Fricke, E.; Heidorn, H. (2003): Effizientes landwirtschaftliches Beregnungs-Management. Available at http://www.fachverband-feldberegnung.de/pdf/Beregnu1.pdf

Fröhlich, J., Knieling, J., Schaerffer, M., Zimmermann, Th. (2011): Instrumente der regionalen Raumordnung und Raumentwicklung zur Anpassung an den Klimawandel, neopolis working papers: urban and regional studies; no 10, HafenCity Universität Hamburg, 2011.

Frontier Economics (2008): Kosten von Stromversorgungsunterbrechungen. London. http://www.frontier-economics.com/_library/pdfs/PRS-Frontier-RWE_VOLL%20Study_18082008-stc.pdf.

GDV (2009): Deutschland und Europa im Wahljahr 2009, Die Positionen der deutschen Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft GDV, Mai 2009, Berlin.

GDV (2010a): Überschwemmung kann jeden treffen – immer noch 74% ohne passenden Versicherungsschutz, Pressemitteilung des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungs-wirtschaft GDV vom 10. August 2010, online abrufbar unter www.gdv.de.

GDV (2010b): Versicherungsgipfel Sachsen: Private Absicherung gegen Naturgefahren in Sachsen ausbauen, Pressemitteilung des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft GDV vom 26. Oktober 2010, online abrufbar unter www.gdv.de.

Geier, W. (2009): Klimawandel und Bevölkerungsschutz. Präsentation auf „AGBF-Fachtagung 2009“, Wilhelmshaven.

Geneva Association (2009): The insurance industry and climate change – Contribution to a global debate, the Geneva Reports, Risk and Insurance Research No. 2, Juli 2009, Genf.

Giebeler, B.; Froitzheim, T. (2010): Die ADFC-Radreiseanalyse 2010. 11. bundesweite Erhebung zum fahrradtouristischen Markt, Internationale Tourismus-Börse Berlin (ITB), März 2010, Available at http://www.adfc.de/ADFC-ReisenPLUS/Fachinfos/ADFC-Radreiseanalyse/Die-ADFC-Radreiseanalyse-2010.

Gren, I.M.; T. Söderqvist; F. Wulff (1997): Nutrient reductions to the Baltic Sea: Ecology, costs and benefits. Journal of Environmental Management 51, p. 123–143.

Grossmann, M.; Hartje, V.; Meyerhoff, J. (2010): Ökonomische Bewertung naturverträglicher Hochwasservorsorge an der Elbe. Naturschutz und Biologische Vielfalt. Nr. 89, Bonn.

Grothmann, T.; Krömker, D.; Homburg, A.; Siebenhüner, B. (Hrsg.) (2009): KYOTO$^{plus}$-NAVIGATOR Praxisleitfaden zur Förderung von Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel – Erfolgsfaktoren, Instrumente, Strategien. Ergebnisse des Projektes „ErKlim – Erfolgsfaktoren für Klimaschutz und Klimaanpassung“ in der Downloadfassung vom April 2009. Available at http://www.erklim.uni-oldenburg.de/download/KyotoPlusNavigator_Downloadfassung_April2009_090419.pdf

Günthert, F.W.; Reicherter, E. (2002): Investitionskosten der Abwasserentsorgung. München.

Hahn, F. (2004): Künstliche Beschneiung im Alpenraum. Ein Hintergrundbericht. Herausgegeben von CIPRA, Available at http://www.cipra.org/de/alpmedia/dossiers/11.

Hampicke, U. et al. (1991): Kosten und Wertschätzung des Arten- und Biotopschutzes. UBA-Berichte 3/91, Berlin.

Hecht, D.; Karl, H. (2002): Volkswirtschaftliche Auswirkungen einer Revitalisierung einer Unstrutaue. In: Dehnhardt, A.; Meyerhoff, J.: Nachhaltige Entwicklung der Stromlandschaft Elbe. Nutzen und Kosten der Wiedergewinnung und Renaturierung von Überschwemmungsauen. Kiel.

HELCOM (2009): Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region. Balt. Sea Environ. Proc. No. 115B

Hennegriff, W.; Ihringer, J.; Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. KW Korrespondenz Wasserwirtchaft 2008 (1) Nr. 6, p. 309–314

Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, M.M.; Mekonnen, M.M. (2009): Water Footprint manual - State of the Art 2009, Enschede, The Netherlands: Water Footprint Network.

Hoffmann, B. (2009): Mündliche Mitteilung.

Hoffmann, C. C.; Baattrup-Pedersen, A. (2007): Re-establishing freshwater wetlands in Denmark. In: Ecological Engeneering, 30, p. 157-166.

Hoffmann, E., Rotter, M. und M. Welp (2009): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Verkehrsinfrastruktur. Berlin/Eberswalde.

Hofman, D. und Brukoff, P. (2006): Insuring Public Finances Against Natural Disasters – A Survey of Options and Recent Initiatives, IMF Working Paper WP06/199, August 2006.

Holeck, S. (2008): Energieoptimierung in Krankenhäusern. Qualität und Quantität des Energiebedarfs von Krankenhäusern unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses des architektonischen und baukonstruktiven Entwurfes. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar. Available at http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2008/1291/pdf/Dissertation.pdf.

Hübler, M.; Klepper, G. (2007): Kosten des Klimawandels: Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Frankfurt am Main. Available at http://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/2kosten-des-klimawandels-die-wirkung-steigender-temperaturen-auf-gesundheit-und-leistungsfahigkeit.

IEEP et al. (2010): Costs and Socio-Economic Benefits associated with the Natura 2000 Network.

Iglesias, A. et al. (2007): Adaptation to Climate Change in the Agricultural Sector. AEA Energy & Environment, Didcot, UK.

IHK Nord Westfalen (2006): Wirtschaftsspiegel. Nr.1, 2006. Available at http://www.ihk-nordwestfalen.de/fileadmin/medien/01_Mittelstand/06_Oeffentlichkeitsarbeit/Wirtschaftsspiegel/medien/2006_01.pdf.

Infras (2008): Volkswirtschaftliche Bedeutung der Wetterdienste in der Schweiz. Machbarkeitsstudie für MeteoSchweiz, Zürich.

Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2003): Aktionsplan Hochwasserschutz Elbe. Magdeburg.

Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2011): Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse (Recherche) zu den Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime im Einzugsgebiet der Elbe, besonders im Hinblick auf das Auftreten von Hochwasser (Stand: Oktober 2011).

Interwies, E.; Krämer, A.R.; Kranz, N.; Görlach, B.; Dworak, T.; Borchardt, T.; Richter, S.; Willeke, J. (2004): Grundlagen für die Auswahl der kosteneffizientesten Maßnahmenkombinationen zur Aufnahme in das Maßnahmenprogramm nach Artikel 11 der Wasserrahmenrichtlinie – Handbuch. UBA-Texte 02/04, Berlin

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.

IPCC (2007): Klimaänderungen 2007. Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Bern/Wien/Berlin, Available at http://www.bmbf.de/pub/IPCC2007.pdf.

IPCC WG I (2007): Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IUCN World Conservation Union (1993). Parks for life: Report of the IVth World Congress on National Parks and Protected Areas. Gland (Switzerland): IUCN.

IWW; ProgTrans (2007): Aktualisierung der Wegekostenrechnung für die Bundesfernstraßen in Deutschland. Basel/Karlsruhe.

Jakob, M.; Jochem, E.; Baumgartner, A.; Menti, U.-P.; Plüss, I.: Energie-Effizienz, Kosten und Komfort in Gebäuden des Dienstleistungssektors. In: Tagungsband Status-Seminar „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen“ 2006, Available at http://www.cepe.ethz.ch/publications/Jakob_Jochem_Baumgartner_Menti_Pluss_Statusseminar06_UpdatedVersion_061123.pdf.

Jochem, E.; Schade, W. (2009): Report of the Reference and 2°C Scenario in Europe. Deliverable M1.2 in the project Adaptation and Mitigation Strategies Supporting European Climate Policy (ADAM) in FP 6 of the European Commission, DG TREN. Available at: http://adamproject.info/index.php/Download-document/481-D-M1.2.html.

Jüpner, R.; Gretzschel, M.; Ellmann, H.; Schulze, B. (2011): Überprüfung von Hochwasserrückhalteräumen sowie Beurteilung hochwasser-, insbesondere schadstoffbedingter Risiken und Empfehlungen zu angepassten Nutzungen im Rahmen des INTERREG IVB Projektes „LABEL“. Available at http://www.label-eu.eu/uploads/media/EndberichtLABEL-16052011.pdf.

Kaltofen, M.; Hentschel, M.; Kaden, S.; Dietrich, O.; Koch, H. (2011): Modellierung der Wasserverfügbarkeit im Elbeeinzugsgebiet und Auswirkungen des globalen Wandels im deutschen Teilgebiet. In: Wechsung, F., Hartje, V., Kaden, S., Venohr, M., Hansjürgens, B., Gräfe, P. (Hrsg.): Wirkungen des Globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbeeinzugsgebiet. PIK-Report, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Kap. 3.1

Keil, M.; Kiefl, R.; Strunz, G. (2005): CORINE Land Cover 2000 – Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landnutzungsdaten für Deutschland. Abschlussbericht zum F+E Vorhaben des UBA FKZ 201 12 209. Available at http://www.corine.dfd.dlr.de/media/download/clc2000_endbericht_de.pdf

Klein, A. (2007): Klimawandel und Tourismus in der Europäischen Union. Folgen für den Wintersport- und Sommertourismus. Saarbrücken.

Klein, R.J.T.; Nicholls, R.J.; Ragoonaden, S.; Capobianco, M.; Aston, J.; Buckley, E.N. (2001): Technological Options for Adaptation to Climate Change in Coastal Zones. Journal of Coastal Research 17 (3), S. 531–543.

Kobernuß, J.-F. (2009): Tourismusstrategie 2015. Gemeinsam vom Geheimtipp zum erfolgreichen Reiseziel. Herausgegeben durch das Ministerium für Wirtschaft und Wissenschaft des Saarlandes, Saarbrücken.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2008): Impact Assessment. Document accompanying the Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020. Brüssel, SEC(2008) 85/3.

Koppe, C.; Jendritzky, G. (2004): Die Auswirkungen der Hitzewellen 2003 auf die Mortalität in Baden-Württemberg: Gesundheitliche Auswirkungen der Hitzewelle im August 2003. Sozialministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.

Kreutzer, R. (2008): Katastrophenschutz auf dem Prüfstand. Analysen, Prognosen und Empfehlungen für Deutschland. Herausgegeben von Allianz Deutschland AG. München.

Krings, S. (2010): Anpassungsbedarf: Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bevölkerungsschutz. Präsentation zu „Dialoge zur Klimaanpassung – Bevölkerungsschutz“, Dessau, 15.04.2010.

Kröll, A. (2000): Künstliches oder besser technisches Beschneien – Möglichkeiten und Grenzen. Konferenzpublikation, Fachtagung „Technische Beschneiung und Umwelt“, 15. November 2000. Herausgegeben durch Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, S. 25-34.

Kuttler, W., Dütemeyer, D.; A.B. Barlag (2008): Klimatologisches Gutachten zur Beurteilung der stadtklimatischen Auswirkungen einer zusätzlichen Baugebietsdarstellung im Bereich Rommelshauser Straße in Stuttgart-Bad Cannstatt, Auftraggeber: Landeshauptstadt Stuttgart, Essen.

KVH 2010: Gesundheitsprävention bei Hitzeperioden. Available at http://www.kvhessen.de/kvhmedia/Downloads_neu/Patienten/Hitzewarnsystem_HSM__pdf-width--height-.pdf, 18.11.2010.

Land Brandenburg (2011): Richtlinien zur Erstellung von Katastrophenschutzplänen. Available at http://www.bravors.brandenburg.de/sixcms/detail.php?gsid=land_bb_bravors_01.c.12874.de.

Landesanstalt für Pflanzenbau (2002): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen. In: Merkblätter für die umweltgerechte Landbewirtschaftung. Nr. 24, August 2002.

Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (o.J.). Hochwasserschutzkonzeption.

Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen (2010): Kaufwerte für Grundstücke 2008. Statistische Berichte Niedersachsen, Hannover.

Leviäkanga, P., Tuominen, A., Molarius, R., Schabel. J., Toivonen, S. et al. (2011): Review on extreme weather impacts on transport systems, Deliverable 1 in the frame of the EU FP 7 project EWENT (Extreme weather impacts on European networks of transport).

LHW (2010): Deichrückverlegung im Bereich Lödderitzer Forst im Rahmen des Naturschutzgroßprojektes "Mittlere Elbe". Anlass des Vorhabens. Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt. Available at http://www.deich-loedderitz.info/index.php?option=com_content&view=article&id=47&Itemid=53.

LVwA Sachsen-Anhalt (2011): NSG Garbe-Alandniederung. Availabe at http://www.lvwa-natur.sachsen-anhalt.de/stendal/nsg0003.htm.

Maibach, M. u.a. (2008): Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Produced within the study Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT). Delft.

Mann, G. (o.J,200x): Ansätze zu objektbezogenen Kosten-Nutzen-Analysen. Fachvereinigung Bauwerksbegrünung.

Mathis, P.; Siegrist, D.; Kessler, R. (2003): Neue Skigebiete in der Schweiz. Planungsstand und Finanzierung von touristischen Neuerschließungen. Bern.

MAZ (2011): Leichte Deichschäden bei Wittenberge/ Polder bei Lenzen geflutet. Hochwasser: Elbeflut reicht in der Prignitz bis an die Deichkronen. 22.01.2011. Available at http://www.maerkischeallgemeine.de/cms/beitrag/11995205/62249/.

Mersmann, M. (2010): Untersuchung zur klimatischen Auswirkung von Dachbegrünungen auf das Mikroklima von hochverdichteten Bebauungsstrukturen am Beispiel des innerstädtischen Bereichs der Stadt Düsseldorf, Masterarbeit an der Ruhr-Universität Bochum.

Meyerhoff, J. (2002): Der Nutzen aus einem verbesserten Schutz biologischer Vielfalt in den Elbeauen: Ergebnisse einer Kontingenten Bewertung. In Dehnhardt, A.; Meyerhoff, J. (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung der Stromlandschaft Elbe. Nutzen und Kosten der Wiedergewinnung und Renaturierung von Überschwemmungsauen. Kiel.

Meyerhoff, J.; Dehnhardt, A. (2002): Die ökonomische Bewertung von Feuchtgebieten. In: Dehnhardt, A.; Meyerhoff, J.: Nachhaltige Entwicklung der Stromlandschaft Elbe. Nutzen und Kosten der Wiedergewinnung und Renaturierung von Überschwemmungsauen. Kiel.

MLUR Brandenburg (2003): Ergebnisse aus dem Landespilotprojekt „Reduzierte Bodenbearbeitung“. Frankfurt/Oder.

Mutafoglu, K. (2010): Assessing the economics of natural resource use in a changing environment. The case of industrial water demand in the Elbe river basin. Band 5 der Berliner Beiträge zur Ökologie, Weißensee-Verlag, Berlin.

Naumann, S. et al. (2011): Assessment of the potential of ecosystem-based approaches to climate change adaptation and mitigation in Europe. Final Report to the European Commission, DG Environment, Contract no. 070307/2010/580412/SER/B2.

Nash, C. et al. (2008): GRACE - Generalisation of research on accounts and cost estimation, Case study 1.4: state-of-the-art of external marginal accident costs.

Neus, W. (1998): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, Mohr Siebeck.

News.at (2003): "Mega-Blackout": Millionenschäden wegen Stromausfalls in Italien. Available at http://www.news.at/articles/0339/15/65895_s2/mega-blackout-millionenschaeden-stromausfalls-italien.

Oelze, M. (2004): Mündliche Mitteilung. Landesumweltamt Brandenburg.

Öörni, R. und R. Hautala (2007): The Benefits of Meteorological Information for Transport – a Review and Case Studies.

OSPAR (2009): Eutrophication status of the OSPAR maritime area. Second OSPAR integrated report. London: OSPAR Commission.

Pimentel, D. et al. (1995): Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. in: Science, Vol. 267, 24 February 1995, p. 1117 – 1123.

Raschky, P.A., Schwindt, M., Schwarze, R., H. Weck-Hannemann (2008): Risikotransfersysteme für Naturkatastrophen in Deutschland, Österreich und der Schweiz – Ein theoretischer und empirischer Vergleich. in: DIW Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 4/2008, 53–68.

Rechenbach, P. (2007): Klimawandel: Auswirkungen auf den operativen Einsatz und Ressourcenbedarf im Bevölkerungsschutz. Behörde für Inneres, Katastrophen-, Brand- und Bevölkerungsschutz Hamburg. Präsentation Nov. 2007. Available at http://www.bbk.bund.de/nn_402296/SharedDocs/Publikationen__extern/Kritis/Klimaworkshop-Rechenbach-20071119,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Klimaworkshop-Rechenbach-20071119.pdf.

Regionaler Klimaatlas Deutschland (2011): Regionaler Klimaatlas Deutschland. Herausgegeben von Helmholtz-Gemeinschaft. Available at http://www.regionaler-klimaatlas.de.

Reichert, D. (2002): Evakuierung und Unterbringung. „rescue 2002“. Fachkongress für interdisziplinäre Zusammenarbeit im Rettungswesen und in der Gefahrenabwehr, Stuttgart, 01. – 03. Februar 2002.

Reidenbach, M., Hencel, D., Meyer, U., Preuß, Th., Riedel, D. (2010): Neue Baugebiete: Gewinn oder Verlust für die Gemeindekasse? Fiskalische Wirkungsanalyse von Wohn- und Gewerbegebieten, Deutsches Institut für Urbanistik.

Renger, J. (2011): Informationen zum Radwegebau auf Rügen. Available at http://www.radfahren-auf-ruegen.de/servicewege.htm.

Rheinland-Pfalz (2011): 2010 nachhaltig in Radwege investiert. Pressemitteilung der Landesregierung vom 25.02.2011, Available at http://www.rlp.de/einzelansicht/archive/2011/february/article/2010-nachhaltig-in-radwege-investiert/.

Richards, J.A.; Nicholls, R.J. (2009): Impacts of climate change in coastal systems in Europe. PESETA-Coastal Systems study. Document EUR 24130 EN of the Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Riegel, C. (2008): Klimawandel und Bevölkerungsschutz – Neue Herausforderungen auf dem Weg zur resilienten Gesellschaft. Präsentation anlässlich des 84. Darmstädter Seminars „Klimawandel – Markt für Strategien und Technologien“ am 26.06.2008. Available at http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/aktuelles/deutsch/08.06.26aRiegel_KlimaBevS_Darmstadt.pdf

Rosenzweig, C., Solecki, W. D; Slosberg, R. B. (2006): Mitigating New York City’s Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces, New York City Regional Heat Island Initiative, im Auftrag von New York State Energy Research and Development Authority.

Rühs, M. (2003): Redynamisierung von Fließgewässern – Ökonomische Betrachtung der Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Nutzung der Aue in verschiedenen Rückbauszenarien. Bornimer Agrartechnische Berichte 33: 34-44, Available at http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Aktuell/bab-33-ATB_III.pdf.

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (2007): Umweltgerechte Landwirtschaft 2005. Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung des Programms „Umweltgerechte Landwirtschaft“(UL) in der Förderperiode 2000 bis 2005. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 1/2007, Dresden.

Sartorius, C.; Hillenbrand, T.; Walz, R. (2011): Impact and cost of measures to reduce nutrient emissions from wastewater and storm water treatment in the German Elbe river basin. in: Regional Environmental Change 11 (2), p. 377–391

Schering, B. (2009): Position: Entwicklung eines modernen Stromnetzes mittels Erdkabel. Fraktion DIE LINKE. im Bundestag. Berlin.

Scholz, M., Stab, S., Dziock, F., Henle, K . (Hrsg.) (2005) Lebensräume der Elbe und ihrer Auen: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Berlin.

Schröter, D. et al (2004): ATEAM – Final report. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.

Schunicht, E.; Schernewski, G.; Scheibe, R. (2009): Oderflut 1997: Ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen und Konsequenzen. In: Schernewski, G.; Janßen, H.; Schumacher, S. (Hrsg): Coastal Change in the southern Baltic Sea Region. Coastline Reports 12 (2009), S. 187 – 199.

Schwarze, R. und Wagner, G. (2003): Marktkonforme Versicherungspflicht für Naturkatastrophen – Bausteine einer Elementarschadenversicherung. Wochenbericht des DIW Berlin 12/03.

Schwarze, R. und Wagner, G. (2005): Versicherungspflicht gegen Elementarschäden – Ein Lehrstück für Probleme der volkswirtschaftlichen Politikberatung. in: DIW Research Notes 3/2005.

Schwarze, R. Wagner, G. (2006): Versicherungspflicht gegen Elementarschäden: Warum wir sie brauchen, aber nicht bekommen. in: Intervention Zeitschrift für Ökonomie, Jg.6, Heft 2, 225–234.

SFV (2003): Die Hitzewelle drosselte Stromproduktion der konventionellen Kraftwerke. Available at http://www.sfv.de/lokal/mails/phj/hitzewel.htm.

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. Dessau: Umweltbundesamt. Available at: http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf.

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2004): Umweltgutachten 2004 – Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Berlin 2004.

Stadt Stuttgart (2009): Stuttgarter Wirtschaftsdaten. Ausgabe 2009.

Stadt Stuttgart (2010): Der Klimawandel – Herausforderungen für die Stadtklimatologie. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 3/2010, Stuttgart.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011a): Gebiet und Bevölkerung – Fläche und Bevölkerung. Available at http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb01_jahrtab1.asp.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011b): Bruttoinlandsprodunkt/Bruttowertschöpfung - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. https://www.regionalstatistik.de/genesis/online;jsessionid=CD529429FF5BE3738812F29898C5B870

Statistisches Bundesamt (2009): Gesundheit - Kostennachweis der Krankenhäuser 2008. Fachserie 12 Reihe 6.3, Available at https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1024877.

Statistisches Bundesamt (2010): Landwirtschaftliche Bodennutzung - Anbau auf dem Ackerland. 2010 (Vorbericht). Fachserie 3 Reihe 3.1.2. https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1025980.

Statistisches Bundesamt (2010): Kaufwerte für landwirtschaftliche Grundstücke 2009. Fachserie 3 Reihe 2.4, Wiesbaden. Available at http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Preise/Baupreise/KaufwerteLandwirtschaftlicheGrundstuecke2030240097004,property=file.pdf.

Statistisches Bundesamt (2011a): Gesundheit - Grunddaten der Krankenhäuser 2009. Fachserie 12 Reihe 6.1.1, Available at https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige.csp&ID=1026795.

Statistisches Bundesamt (2011b): Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen. Available at http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Inlandsprodukt/Tabellen/Content75/BWSnachBereichen,templateId=renderPrint.psml.

Statistisches Bundesamt (2011c): Auszug aus dem Gemeindeverzeichnis: Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche und Bevölkerung. 31.12.2009. Available at http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Aktuell/04__KreiseAktuell.psml.

Staufer, P.; Leckebusch, G.; Pinnekamp,J. (2010): Die Ermittlung der relevanten Niederschlagscharakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel. KA Korrespondenz Abwasser Abfall 57, 12, S. 1203–1208.

Stern, N. (2007): The Economics of Climate Change. The Stern Review. Cambridge University Press

TEEB (2009) TEEB Climate Issues Update. September 2009, Available at http://www.teebweb.org/LinkClick.aspx?fileticket=L6XLPaoaZv8%3D.

Teich, M. u.a. (2007): Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneiung. Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneiung. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

Thomas, C. D. et al. (2004): Extinction risk from climate change. in: Nature, Vol. 427, 8 January 2004, p. 145-148.

Trägerverbund Burg Lenzen e.V. (2011): Naturschutzgroßprojekt Lenzener Elbtalaue. Available at http://www.naturschutzgrossprojekt-lenzen.de.

Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H.; Peter, M.; Sartorius, C. (2011): Ökonomische Aspekte der Anpassung an den Klimawandel. Literaturauswertung zu Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Herausgegeben vom Umweltbundesamt, Dessau. Available at http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4185.html.

Turner, R.K.; Georgiou, S.; Gren, I.-M.; Wulff, F.; Barrett, S.; Söderqvist, T.; Bateman, I.J.; Folke, C.; Langaas, S.; Zylicz, T.; Mäler, K.G.; Markowska, A. (1999): Managing nutrient fluxes and pollution in the Baltic: an interdisciplinary simulation study. in: Ecological Economics 30, p. 333–352.

UK Rail Safety and Standards Board (2003): Research Programme Engineering: Safety implications of weather, climate and climate change, London.

Ulrichs, C. (2011): Persönliche Kommunikation.

Umweltbundesamt (2007a): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Dessau.

Umweltbundesamt (2007b): Ausgewählte Hochwasserereignisse. Available at http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2396.

Umweltbundesamt (2011): Daten zur Umwelt – Umweltzustand in Deutschland. Wassernutzung in der Landwirtschaft. Available at http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/ Available atpublic/theme.do?nodeIdent=3385.

Van der Lee, G.; Olde Venterink, H.; Asselmann, N. (2004): Nutrient retention in floodplains of the Rhine distributaries in The Netherlands. in: River Research and Applications, 20, 3, p. 315-325.

Van Ierland, E.C.; de Bruin, K.; Delink, R.B.; Ruijs, A. (eds.) (2007): Routeplanner naar een klimaatbestendig Nederland - A qualitative assessment of climate adaptation options and some estimates of adaptation costs. Study performed within the framework of the Netherlands Policy Programme ARK. Environmental Economics and Natural Resources, Wageningen UR.

Verband Deutscher Seilbahnen (2011): Beschneiungsanlagen in Deutschland. Available at http://www.seilbahnen.de/beschneiungsanlagen-in-deutschland.

Verivox (2003): Hunderte Millionen Euro Schaden durch Stromausfall in Italien. Available at http://www.verivox.de/nachrichten/hunderte-millionen-euro-schaden-durch-stromausfall-in-italien-5093.aspx.

Vopel, H. (o.J.): Agrarumweltmaßnahmen in Deutschland. Ausgestaltung und Entwicklung von Agrarumweltprogrammen in Sachsen. Herausgegeben vom Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Available at http://www.netzwerk-laendlicher-raum.de/fileadmin/sites/ELER/Dateien/05_Service/Veranstaltungen/2008/Agrarumweltmassnahmen08/04_Vopel_endg.pdf.

Vries, Jochem de und Maarten Wolsink (2009): Making space for water. Spatial planning and water management in the Netherlands. In: Davoudi, Simin; Crawford, Jenny; Mehmood, Abid (Hg.): Planning for climate change. Strategies for mitigation and adaptation for spatial planners. London, Sterling VA: Earthscan, S. 191–204.

Wagner, A.; Laps, S. (2005): November 2005: Schneechaos in Teilen Nordrhein-Westfalens. Herausgegeben von meteomedia, Available at http://www.meteomedia.de/index.php?id=229.

Werner, P.; Chmella-Emrich, E.; Vilz, A. (2008): Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland. BBR-Online-Publikation Nr. 10/2008.

Wreford, A., Hulme, M., Adger, N. (2007): Strategic Assessment of the Impacts, Damage Costs, and AdaptationCosts of Climate Change in Europe. Available at adamproject.info/index.php/Download-document/210-D-A2.7a.html

Wurbs, D.; Steininger, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden: Untersuchungen zu Auswirkungen des Klima-wandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Herausgegeben vom Umweltbundesamt, UBA-Texte Climate Change 16/2011, Dessau.

WWF (2008): Deichrückverlegung an der Elbe. Steckbriefe zur WRRL-Umsetzung. Dessau.

WWF (2009): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fliessgewässern. Frankfurt/Main.

WWF (2011): Gemeinsam mit Bund und Land sichert die Umweltstiftung die Auenwälder der Elbe. Available at http://www.wwf.de/regionen/elbe/elbe-projekt/.

Zielaskowski, J. (2004): Möglichkeiten und Perspektiven des ökologischen Hochwasserschutzes an der Elbe. Available at http://www.living-rivers.de/hochwassertagung/vortraege/Oekol_Hw_schutz.pdf.

Zielaskowski, J.; Lüderitz, V. (2004): Hochwasserschutz und Naturschutz – Synergien und Konflikte am Beispiel der Elbe in Sachsen – Anhalt. Magdeburg.

Zimmermann, Th.; J. Knieling (2010): Klimaangepasstes Leitbild für die Samtgemeinde Gartow: „Entwicklung im Einklang mit der Natur“, im Rahmen des Forschungsprojektes KLIMZUG-Nord.