



Hamburgisches  
WeltWirtschafts  
Institut



**Gutachten zu den  
ökonomischen Folgen des Klimawandels und  
Kosten der Anpassung für Hamburg**

für die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt  
der Freien und Hansestadt Hamburg

Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut gemeinnützige GmbH (HWWI)

Heimhuder Straße 71 | 20148 Hamburg

Tel.: +49 (0)40 34 05 76 - 0 | Fax: +49 (0)40 34 05 76 - 776

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH

Pfalzburger Straße 43/44 | 10717 Berlin

Tel.: +49 (0)30 86 88 0 - 0 | Fax: +49 (0)30 86 88 0-100

30. Juli 2012

# Gesamt-Inhaltsverzeichnis

## 1: Stand des Wissens

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b> .....	8
<b>2</b>	<b>Grundsatzfragen und Begriffe</b> .....	10
<b>3</b>	<b>Handlungsfelder und Vorgehensweise</b> .....	23
3.1	Handlungsfelder .....	23
3.2	Vorgehensweise .....	23
<b>4</b>	<b>Kenntnisstand zu den Handlungsfeldern in der Stadt Hamburg</b> .....	25
4.1	Küsten- und Hochwasserschutz .....	25
4.1.1	Auswirkungen des Klimawandels.....	25
4.1.2	Schadenskosten.....	25
4.1.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten.....	28
4.1.4	Zusammenfassung.....	31
4.2	Wasserwirtschaft.....	33
4.2.1	Auswirkungen des Klimawandels.....	33
4.2.2	Schadenskosten.....	34
4.2.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten.....	35
4.2.4	Zusammenfassung.....	38
4.3	Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz .....	40
4.3.1	Auswirkungen des Klimawandels.....	40
4.3.2	Schadenskosten.....	41
4.3.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten.....	45
4.3.4	Zusammenfassung.....	47
4.4	Wirtschaft, Energie und Tourismus.....	50
4.4.1	Auswirkungen des Klimawandels.....	50
4.4.2	Schadenskosten.....	51
4.4.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten.....	55
4.4.4	Zusammenfassung.....	57
4.5	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur.....	59
4.5.1	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen.....	59
4.5.2	Infrastruktur .....	62
4.6	Menschliche Gesundheit.....	69
4.6.1	Auswirkungen des Klimawandels.....	69
4.6.2	Schadenskosten.....	69
4.6.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten.....	72
4.6.4	Zusammenfassung.....	74
4.7	Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst.....	76
4.7.1	Katastrophenschutz als Querschnittsaufgabe .....	76
4.7.2	Maßnahmen und Kosten.....	77
4.7.3	Zusammenfassung.....	79
<b>5</b>	<b>Fazit</b> .....	80
	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	82

## 2: Fallstudien

<b>1</b>	<b>Einleitung und Überblick</b>	91
1.1	Einleitung	91
1.2	Fallstudienauswahl und Überblick	91
<b>2</b>	<b>Fallstudie 1: Handlungsfeld Wasserwirtschaft – Steigende Grundwasserstände</b>	95
2.1	Beschreibung der Maßnahme	95
2.2	Kosten- und Nutzenbewertung	97
	2.2.1 Kostenschätzung	97
	2.2.2 Bewertung der Nutzen	98
	2.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen	101
2.3	Bewertung der Maßnahme	102
2.4	Fallstudienliteratur	104
<b>3</b>	<b>Fallstudie 2: Handlungsfeld Bauen – Grüne Dächer für Hamburg</b>	106
3.1	Beschreibung der Maßnahme	106
3.2	Kosten- und Nutzenbewertung	107
	3.2.1 Kostenschätzung	108
	3.2.2 Bewertung der Nutzen	111
	3.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen	116
3.3	Bewertung der Maßnahme	117
3.4	Fallstudienliteratur	118
<b>4</b>	<b>Fallstudie 3: Handlungsfeld Landwirtschaft – Angepasste Sortenwahl</b>	120
4.1	Beschreibung der Maßnahme	120
4.2	Kosten- und Nutzenbewertung	122
	4.2.1 Kostenschätzung	124
	4.2.2 Bewertung der Nutzen	126
	4.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen	129
4.3	Bewertung der Maßnahme	130
4.4	Fallstudienliteratur	132
<b>5</b>	<b>Fallstudie 4: Handlungsfeld Katastrophenschutz – Der Starkregen im Juni 2011</b>	134
5.1	Problemstellung	134
5.2	Ereignisverlauf	135
5.3	Vorgehen	136
	5.3.1 Schadenskategorien	139
	5.3.2 Schadensbeschreibung	139
	5.3.2.1 Schäden an öffentlichen Gebäuden und Infrastruktur	139
	5.3.2.2 Schäden der Haushalte	140
	5.3.2.3 Schäden der Unternehmen	141
5.4	Kostenschätzung	142
	5.4.1 Richtwerte für die Schadenshöhen	142
	5.4.2 Schadenskalkulation	147
5.5	Mögliche Anpassungsmaßnahmen	149
5.6	Fazit und Handlungsempfehlungen	151
5.7	Fallstudienliteratur	153
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	155

## 3: Empfehlungen

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	161
<b>2</b>	<b>Grundsätzliche Überlegungen</b> .....	162
2.1	Anpassungserfordernisse .....	162
2.2	Herausforderungen in der Klimaanpassung.....	163
2.3	Umsetzung von Anpassungsaktivitäten via Strategien, Instrumenten und Maßnahmen .....	166
<b>3</b>	<b>Methoden der Maßnahmenbewertung und -auswahl</b> .....	168
3.1	Ausgewählte Bewertungsmethoden für Anpassungsmaßnahmen .....	168
3.1.1	Kosten-Nutzen-Analysen .....	168
3.1.2	Multikriterien-Analyse .....	175
3.1.3	Sonstige .....	180
3.2	Priorisierung von Handlungsfeldern und Maßnahmen .....	180
3.3	Entscheidungsunterstützungstools.....	185
<b>4</b>	<b>Empfehlungen für die Anpassungsstrategie der Stadt Hamburg</b> .....	187
4.1	Allgemeine Handlungsempfehlungen .....	187
4.2	Empfehlungen für einzelne Handlungsfelder .....	187
4.2.1	Küsten- und Hochwasserschutz .....	187
4.2.2	Wasserwirtschaft.....	189
4.2.3	Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz .....	190
4.2.4	Wirtschaft, Energie und Tourismus.....	192
4.2.5	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur.....	195
4.2.5.1	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen.....	195
4.2.5.2	Infrastruktur .....	196
4.2.6	Menschliche Gesundheit.....	197
4.2.7	Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst.....	198
4.3	Ausblick .....	200
	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	201

## Vorbemerkung

Die Freie und Hansestadt Hamburg erarbeitet derzeit eine Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg hat aus diesem Grund ein Gutachten zu ökonomischen Fragestellungen der Anpassungsproblematik in Auftrag gegeben.

Der Auftrag war in drei Teile untergliedert. Die drei Teile und ihre Fertigstellungsdaten lauten:

Los 1	-	Stand des Wissens	30. März 2012
Los 2	-	Fallstudien	18. Juni 2012
Los 3	-	Empfehlungen	30. Juli 2012

Die Texte zu den einzelnen Losen finden sich auf den folgenden Seiten.

Die **Ansprechpartner** des Projektteams sind:

Dr. Sven Schulze

Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut gemeinnützige GmbH (HWWI)

Heimhuder Straße 71

20148 Hamburg

Tel.: +49 (0)40 34 05 76 – 355

E-Mail: [s-schulze@hwwi.org](mailto:s-schulze@hwwi.org)

Jenny Tröltzsch

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH

Pfalzburger Straße 43/44

10717 Berlin

Tel.: +49 (0)30 86 88 0 – 169

E-Mail: [Jenny.Troeltzsch@ecologic.eu](mailto:Jenny.Troeltzsch@ecologic.eu)

## **Los 1: Stand des Wissens**

Max Grünig, Julia Kowalewski, Sven Schulze, Silvia Stiller, Jenny Tröltzsch

unter Mitarbeit von Tim Hübner

## Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung .....	8
2	Grundsatzfragen und Begriffe .....	10
3	Handlungsfelder und Vorgehensweise .....	23
3.1	Handlungsfelder .....	23
3.2	Vorgehensweise .....	23
4	Kenntnisstand zu den Handlungsfeldern in der Stadt Hamburg .....	25
4.1	Küsten- und Hochwasserschutz .....	25
4.1.1	Auswirkungen des Klimawandels .....	25
4.1.2	Schadenskosten .....	25
4.1.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten .....	28
4.1.4	Zusammenfassung .....	31
4.2	Wasserwirtschaft .....	33
4.2.1	Auswirkungen des Klimawandels .....	33
4.2.2	Schadenskosten .....	34
4.2.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten .....	35
4.2.4	Zusammenfassung .....	38
4.3	Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz .....	40
4.3.1	Auswirkungen des Klimawandels .....	40
4.3.2	Schadenskosten .....	41
4.3.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten .....	45
4.3.4	Zusammenfassung .....	47
4.4	Wirtschaft, Energie und Tourismus .....	50
4.4.1	Auswirkungen des Klimawandels .....	50
4.4.2	Schadenskosten .....	51
4.4.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten .....	55
4.4.4	Zusammenfassung .....	57
4.5	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur .....	59
4.5.1	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen .....	59
4.5.2	Infrastruktur .....	62
4.6	Menschliche Gesundheit .....	69
4.6.1	Auswirkungen des Klimawandels .....	69
4.6.2	Schadenskosten .....	69
4.6.3	Anpassungsmaßnahmen und -kosten .....	72
4.6.4	Zusammenfassung .....	74
4.7	Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst .....	76
4.7.1	Katastrophenschutz als Querschnittsaufgabe .....	76
4.7.2	Maßnahmen und Kosten .....	77
4.7.3	Zusammenfassung .....	79
5	Fazit .....	80
	Quellenverzeichnis .....	82

## 1 Problemstellung

Der Klimawandel stellt Akteure weltweit vor zwei konkrete Herausforderungen. Zum einen besteht die Notwendigkeit, durch Mitigation (Vermeidung) den Zuwachs an Treibhausgasemissionen zu bremsen beziehungsweise den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren und somit den Klimawandel zu vermeiden. Zum anderen ist als Antwort auf die bereits unvermeidlichen Folgen des Klimawandels Adaptation (Anpassung) erforderlich. Während die Vereinbarung und Durchsetzung von Vermeidungsmaßnahmen am sinnvollsten auf internationaler Ebene stattfindet, müssen Anpassungsmaßnahmen auf der nationalen und ihr untergeordneten Ebenen entschieden und implementiert werden.

Die deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel aus dem Jahre 2008 und der aus ihr in 2011 hervorgegangene „Aktionsplan Anpassung“ tragen diesen Überlegungen für Deutschland Rechnung. Einerseits wird dadurch ein Rahmen für ein koordiniertes Vorgehen auf Bundesebene gesetzt. Andererseits wird aus den Dokumenten deutlich, dass relativ wenig Anpassungshandeln in direkter Bundeszuständigkeit in Angriff genommen werden kann. Vielmehr besteht ein Großteil der Anpassungsmaßnahmen des Bundes darin, Akteure auf untergeordneten föderalen Ebenen in der Erarbeitung von Anpassungsstrategien und der Umsetzung von Maßnahmen zu unterstützen. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass die Bundesländer in den Erarbeitungsprozess der Deutschen Anpassungsstrategie und des Aktionsplans umfassend eingebunden wurden und dass der Unterstützung von Kommunen und anderen Akteuren mit Informationen und Finanzmitteln große Bedeutung beigemessen wird. Dies bedeutet aber auch, dass vom Aktionsplan und seiner Umsetzung kaum konkrete Vorgaben für das Handeln auf diesen Ebenen zu erwarten sind, sondern die Priorisierung und Gestaltung von Anpassungsmaßnahmen überwiegend von den Ländern, Kommunen und Regionen selbst vorgenommen werden muss.

Vor diesem Hintergrund haben bereits einige Bundesländer, wie Nordrhein-Westfalen oder Thüringen, Anpassungsstrategien oder -programme erarbeitet. In den übrigen Bundesländern liegen zumindest Klimafolgenberichte vor oder sind Anpassungsstrategien in Vorbereitung. Die Freie und Hansestadt Hamburg spielt in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle, weil sie nicht nur Bundesland sondern auch eine wichtige deutsche Metropole ist. Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass viele große Städte (unter anderem London und New York City) bereits Anpassungsstrategien entworfen haben. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass große Agglomerationen wirtschaftliche und administrative Zentren darstellen,

in denen sich die Bevölkerung und Unternehmen stark konzentrieren. In Kombination mit ihrer geografischen Lage resultiert daraus oft ein hohes Verletzlichkeitspotential von (großen) Städten. Insofern besteht hier aus mehrfacher Sicht Handlungsbedarf, sich planvoll mit der Anpassung an den Klimawandel auseinanderzusetzen.

Zwingender Bestandteil der Umsetzung möglicher Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel ist die ökonomische Bewertung dieser Maßnahmen. Letztlich stehen alle staatlichen und privaten Aktionen unter einem Budgetvorbehalt, der darin besteht, dass die Kosten einer Maßnahme ihren Nutzen unterschreiten und damit rechtfertigen sollten. Im vorliegenden Dokument wird deshalb der Stand des Wissens der ökonomischen Anpassungsforschung dargestellt, um Anhaltspunkte für die Einschätzung von Anpassungsmaßnahmen zu erhalten. Im Folgenden wird zunächst auf einige grundsätzliche Aspekte und Fragestellungen eingegangen, sowie Begriffe und Methoden aufgeführt. Anschließend werden für die Handlungsfelder, die für die Stadt Hamburg relevant sind, anhand ausgewählter Studien Ergebnisse zu den Kosten des Klimawandels und den Kosten von Anpassungsmaßnahmen zusammengetragen und diskutiert. Zugleich wird soweit möglich ein Bezug zu Hamburg hergestellt. Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

## 2 Grundsatzfragen und Begriffe

Anpassung wurde lange in der Diskussion um den Klimawandel vernachlässigt. Erst in den vergangenen Jahren hat sie sich thematisch als gleichberechtigt neben Überlegungen zum Klimaschutz etabliert. Dasselbe gilt für die Forschung zur Anpassung an den Klimawandel, denn auch hier stammen die wesentlichen Erkenntnisse und Fortschritte aus den letzten etwa 10 Jahren. Im Folgenden sollen einige grundlegende Begriffe, Fragen und Methoden diskutiert werden, die wiederholt in späteren Teilen des Textes eine Rolle spielen werden.

### Konzepte

Der Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel differieren aus ökonomischer Sicht in einem entscheidenden Punkt: Während der Klimaschutz, also die Vermeidung von Treibhausgasemissionen, die Eigenschaft eines globalen öffentlichen Gutes aufweist, ist die Anpassung an den Klimawandel eher ein – zumindest national, regional oder lokal – privates Gut (BMF 2010, Hallegatte et al. 2011).<sup>1</sup> Ein öffentliches Gut zeichnet sich dadurch aus, dass es nicht-ausschließbar und nicht-rival im Konsum ist. In Bezug auf den Klimaschutz bedeutet das, dass jeder von den Anstrengungen der anderen profitiert und damit große Anreize bestehen, selber keine Emissionsvermeidung zu betreiben und dies ohne staatliches Eingreifen anderen zu überlassen. Private Güter sind dagegen sowohl ausschließbar als auch rival im Konsum. In Bezug auf die Klimaanpassung bedeutet dies, dass derjenige, der eine Anpassungsmaßnahme durchführt, auch am meisten – oder den ausschließlichen – Nutzen von dieser Maßnahme hat. Tendenziell ist also die Diskrepanz zwischen Akteur und Profiteur, außer im Falle staatlicher oder kollektiver Anpassungsmaßnahmen, in der Klimaanpassung kleiner als beim Klimaschutz. Insofern ist es aus Sicht regionaler Entscheidungsträger und Akteure von besonderer Bedeutung, sich mit dem Thema der Anpassung auseinanderzusetzen. Darüber hinaus zeigt sich meist, dass Maßnahmen sich am ehesten auf der regionalen oder lokalen Ebene durchführen lassen.

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC 2001) definiert Anpassung an den Klimawandel als „Anpassung von natürlichen oder menschlichen Systemen als Antwort auf aktuelle oder erwartete Klimaänderungen oder ihre Effekte, womit Schäden reduziert oder aussichtsreiche Gelegenheiten genutzt werden“ [eigene Übersetzung]. Laut Hallegatte et al. (2011) ist Anpassung der „Mix aus ...

---

<sup>1</sup> Zur genaueren Diskussion siehe „Die Rolle des Staates“ auf den Seiten 8-10.

Änderungen, die Gesellschaften umsetzen müssen, um die negativen Effekte des Klimawandels zu begrenzen und die positiven Effekte zu maximieren“ [eigene Übersetzung]. Gemäß BMF (2010) umfasst eine Anpassungsstrategie alle Maßnahmen, die volkswirtschaftliche Kosten der Klimaänderung verringern oder verhindern.

Es werden verschiedene Arten von Anpassung unterschieden. Zum einen kann Anpassung reaktiv oder vorausschauend (antizipierend) stattfinden. Dies ist gleichbedeutend mit dem Handeln nach dem Eintreten eines Ereignisses, also einer Klimaänderung und seiner Konsequenzen, oder vor dem erwarteten beziehungsweise vermuteten Eintreten eines Ereignisses. Daneben kann Anpassung autonom – teilweise auch als spontan bezeichnet – oder geplant ablaufen. Diese Unterscheidung bezieht sich auf den handelnden Akteur, denn die autonome Anpassung erfolgt privat als Reaktion auf bestimmte Anreize, zum Beispiel Preissignale, während die geplante Anpassung vom Staat durchgeführt oder durch diesen beeinflusst erfolgt. Sie ist mithin aktiv gestaltet (siehe zu den Begriffen unter anderem IPCC 2001, BMF 2010, UNFCCC 2010 und CEPS und ZEW 2010).

Anpassung an den Klimawandel wird entscheidend dadurch bestimmt, wie Veränderungen auftreten. Sie können entweder gradueller Natur sein oder das Ausmaß von extremen Ereignissen annehmen, die räumlich und zeitlich stark konzentriert auftreten. Graduelle Änderungen sind zum Beispiel der allmähliche Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperatur, die Verschiebung der Niederschlagsmuster und Ähnliches. Extreme Ereignisse betreffen dagegen Ausschläge von Wetterereignissen nach oben (Hitzeperioden, starke Niederschläge) oder nach unten (Kälteperioden, Trockenheit). Deren Auftreten dürfte im Zuge des Klimawandels vermutlich zunehmen. Unabhängig von der Anpassung an den Klimawandel wird bereits heute entsprechendes Risikomanagement betrieben. Die Herausforderung besteht in Zukunft darin, hierbei künftige Klimaänderungen mit zu berücksichtigen. Dies gilt zum einen, weil erfahrungsgemäß private Akteure in diesem Zusammenhang oft kurzfristig handeln oder Risiken falsch einschätzen. Zum anderen ist der Planungshorizont für die Wirkung von Maßnahmen gegen Extremereignisse oder Katastrophen oftmals lang und fällt damit tendenziell in den staatlichen Aufgabenbereich. Die folgende Tabelle aus Hallegatte (2009) bietet dazu einen kurzen Überblick.

**Tabelle 1: Exposition und Zuständigkeit der öffentlichen und privaten Sektoren hinsichtlich Katastrophengefahren (Hallegatte 2009)**

Sektor	Zuständigkeit	Zeithorizont (Jahre)	Grad der Exposition
Landnutzungsplanung (zum Beispiel in Flussauen und Küstengebieten)	Öffentlich	>100	+++
Verstärkung der Küste und Hochwasserschutz (zum Beispiel Deiche, Dämme)	Öffentlich	>50	+++
Belastbarere städtische Strukturen (zum Beispiel städtische Dichte, Parks)	Überwiegend öffentlich	>100	+
Sicherung der Wasserinfrastruktur (zum Beispiel Dämme, Stauseen)	Öffentlich und privat	30-200	+++
Klimasichere Gebäude und Häuser (zum Beispiel überflutungssicher)	Öffentlich und privat	30-150	++
Klimasichere Transportinfrastrukturen (zum Beispiel Häfen, von Hochwasser betroffene Brücken)	Öffentlich und privat	30-200	+
Klimasichere Energiegewinnung (zum Beispiel von Dürren betroffene Kühlsysteme von Kraftwerken)	Öffentlich und privat	20-70	+

### Die Rolle des Staates

Nach ökonomischen Überlegungen ist der Staat in der Pflicht zu handeln, wenn Marktversagen vorliegt. Dies gilt auch im Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel (BMF 2010). Hinzu treten allerdings noch Verteilungs- beziehungsweise Gerechtigkeitsaspekte und Fragen der Versorgungssicherheit von Bevölkerung und Unternehmen (CEPS und ZEW 2010). Prinzipiell ist jedoch die Anpassung an den Klimawandel in vielen Bereichen eine private Aufgabe. Demnach kann die private Entscheidung sich nicht anzupassen individuell durchaus rational sein und diese Entscheidung sollte durch staatliche Maßnahmen nur beeinflusst werden, wenn dies gesellschaftlich wünschenswert ist.

Im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel kann es zu Marktversagen kommen, wenn externe Effekte vorliegen, öffentliche Güter betroffen sind, komplementäre (private) Maßnahmen der Koordination bedürfen oder Informationsmängel bestehen (BMF 2010). Daneben nennen CEPS und ZEW (2010) noch vorhandene Unsicherheit (siehe dazu unten mehr) oder die verschiedenen Zeithorizonte von privaten und staatlichen Akteuren. Grundsätzlich steht hinter diesem Argument die Überlegung, dass private Akteure sich in

ihren Entscheidungen eher kurzfristig orientieren, während staatliche Akteure auch längere Fristen und mehrere Generationen im Blick behalten müssen.

Externe Effekte zeichnen sich dadurch aus, dass ein Akteur in seinen Entscheidungen nur die individuellen Kosten oder den individuellen Nutzen berücksichtigt und nicht die Kosten- oder Nutzenwirkungen für andere Akteure. Externe Effekte können sowohl negativ (zum Beispiel Treibhausgasemissionen) oder positiv (zum Beispiel Forschung und Entwicklung und ihre Resultate) sein. Ohne Bepreisung oder Entschädigung des externen Effektes wird der Akteur dann entweder zu viel oder zu wenig von seiner Handlung durchführen. In der Anpassung an Klimawandel sind externe Effekte meist weniger offenkundig als in anderen Bereichen der Umweltpolitik. Jedoch liegen sie auch hier durchaus vor. Einerseits ist es denkbar, dass die Nichtanpassung eines Akteurs im Hinblick auf künftige Änderungen negative Konsequenzen für andere Akteure hat, beispielsweise indem Risiken durch Extremereignisse ignoriert oder nicht hinreichend berücksichtigt werden. Andererseits können Aktionen, wie zum Beispiel die autonome Entseigelung von Flächen, positive Konsequenzen für andere Akteure haben. In beiden Fällen wären Eingriffe durch Regulierung oder ökonomische Instrumente, aber auch Information und Koordination von privatem Handeln angezeigt.

Auf der Basis ähnlicher Überlegungen identifizieren Hallegatte et al. (2011) die folgenden Felder für staatliches Eingreifen:

- Schaffung und Verbreitung von Informationen,
- Änderung von Standards (zum Beispiel in Bezug auf das Niveau des akzeptablen Risikos) und Vorschriften, sowie fiskalische Eingriffe bei externen Effekten,
- Änderung von Institutionen,
- Direkte Anpassung von öffentlicher Infrastruktur und Gebäuden, sowie der Erhalt und Schutz von Ökosystemen.

Der zweite Teil des letzten Punktes – der Erhalt und Schutz von Ökosystemen – lässt sich dabei vielfältig begründen. Neben externen Effekten und der Eigenschaft als öffentliches Gut kommt die Möglichkeit irreversibler Konsequenzen des Klimawandels zum Tragen. Um diese zu vermeiden gilt der Naturschutz – und auch der Schutz einmaliger Kulturgüter – hier als staatliche Aufgabe oder sollte mit staatlichen Anreizen unterstützt werden.

Es ist aber zu beachten, dass hieraus stets Budgetwirkungen folgen (siehe im Einzelnen Bräuer et al. 2009 oder CEPS und ZEW 2010). Diese können darin bestehen, dass Maßnahmen finanziert werden müssen, aber auch darin, dass unterlassene Maßnahmen negative

Auswirkungen auf das (regionale) Wirtschaftswachstum haben können. Zu berücksichtigen sind ferner stets Opportunitätskosten, die darin bestehen, dass verausgabte Mittel nur für einen Zweck zur Verfügung stehen und nicht anderweitig verwendet werden können (Gebhardt et al. 2011).

Das BMF (2010) befürwortet bei staatlichen Entscheidungen zur Anpassung an den Klimawandel grundsätzlich das Subsidiaritätsprinzip, wobei regionale (positive und negative) externe Effekte zu berücksichtigen sind. Beispielsweise erfordert der Schutz gegen Binnenhochwässer oft eine länderübergreifende Koordination, denn die Minderung der Flutgefahr in einem Bundesland kann diese in einem anderen Bundesland durchaus erhöhen (negativer externer Effekt). Ebenso sind aber auch positive länderübergreifende Effekte möglich.

Außerdem kann vermutet werden, dass private Akteure dazu neigen, sich nicht genug anzupassen, da sie auf Kompensationsmaßnahmen durch den Staat hoffen. Im Falle einer Katastrophe oder starker wirtschaftlicher Belastungen einer Gruppe könnte der Staat nicht umhin kommen, die Betroffenen zu entschädigen. Hierdurch entsteht die Gefahr eines *Moral Hazard* oder moralischen Risikos. Daher wird die öffentliche Verwaltung gelegentlich auch als *Insurer of Last Resort* oder *Versicherer der letzten Instanz* bezeichnet (Bräuer et al. 2009). Hier gilt es, diesen Sachverhalt zu erkennen und verfehlte Anreize zu vermeiden beziehungsweise private Akteure zur Anpassung zu bewegen. Dies bedeutet, dass eine Anpassungsstrategie sich nicht auf die Bereiche der öffentlichen Anpassung beschränken darf, sondern explizit auch die private Anpassung begleiten sollte.

Aufbauend auf den genannten Argumenten nennen Hallegatte et al. (2011) Barrieren für private Anpassung, die teilweise deckungsgleich mit den Marktversagen sind. Es werden im Einzelnen aufgeführt:

- Informationsdefizite.
- Eine kollektive Anpassung ist auf der lokalen Ebene organisatorisch nicht möglich.
- Der Zeithorizont der Entscheidungen ist (relativ) lang.
- Es liegen externe Effekte vor.
- Infrastrukturnetzwerke sind entweder staatliche Aufgabe oder staatlich reguliert.
- Den Problemen des Klimawandels nicht angemessene Standards und Regulierungen.
- Finanzielle Restriktionen bei den Akteuren.

Schließlich ist noch zu ergänzen, dass Klimawirkungen sich regional und sektoral sehr unterschiedlich verteilen können. Zwar wird der Ausgleich zwischen Betroffenen oftmals als Begründung für staatliches Handeln herangezogen. Es gibt zu den Verteilungsimplicationen jedoch nach Kenntnis der Autoren keine Untersuchungen auf der Ebene einzelner Staaten oder Regionen.

### **Eigenschaften und Arten von Anpassungsmaßnahmen**

Eine Vielzahl von Autoren identifiziert Unsicherheit als ein zentrales Problem in der Anpassung an den Klimawandel (unter anderem OECD 2008, Hallegatte et al. 2011). Unsicherheit stellt dabei in mehrerer Hinsicht eine Herausforderung dar. Sie hat sowohl Einfluss auf die Kommunikation des Grundproblems (und der Notwendigkeit zur Anpassung), auf die Informationsbereitstellung und auf die Entscheidungsfindung. Nach Dannenberg et al. (2009) bestehen diese Unsicherheiten bezüglich der Klimaänderungen, künftiger Extremereignisse (Häufigkeit und Frequenz), der jeweiligen (ökonomischen) Auswirkungen und der politischen Entscheidungen und Rahmenbedingungen. Das Zusammenspiel dieser verschiedenen Ebenen erschwert Entscheidungen der (privaten und staatlichen) Akteure enorm.

Hallegatte et al. (2011) schlussfolgern, dass Unsicherheit nicht nur ein hohes Informationsbedürfnis auslöst, sondern auch flexible Maßnahmen bedingt. Auch die OECD (2008) verweist darauf, dass flexible und robuste Maßnahmen besonders wichtig sind.

Nach einhelliger Meinung sollten Maßnahmen bei der Anpassung an den Klimawandel einen sogenannten No-regret-Charakter haben. Darunter wird verstanden, dass nach Durchführung der Maßnahme veränderte Rahmenbedingungen, zum Beispiel ein Abweichen der Klimaentwicklung von der -prognose, nicht dazu führen sollten, dass sie negative (oder der ursprünglichen Absicht entgegen gesetzte) Effekte hat. Eine Maßnahme wird diesen Charakter umso eher haben, je größer der Nutzen in anderen Bereichen ist (Co-benefits oder Zusatznutzen) und je geringer daher die potenziell versunkenen Kosten sind.

Eine Maßnahme fällt in die Kategorie „Regret“, wenn sich im Nachhinein herausstellt, dass sie nicht notwendig gewesen wäre. Grundsätzlich kann es dabei auch zu Mal-Adaptation kommen. Diese liegt vor, wenn eine Maßnahme die Vulnerabilität einer Region oder eines Sektors erhöht und damit das Gegenteil der ursprünglichen Intention bewirkt. Würde beispielsweise ein teurer baulicher Flutschutz umgesetzt, der sich im Nachhinein infolge eines unerwartet geringen Meeresspiegelanstiegs als überflüssig erweist, fiel dies unter „Regret“.

Sofern damit aber künftig lokal die finanziellen Mittel für den Hochwasserschutz limitiert werden oder in anderen Gebieten die Flutgefahr steigt, handelt es sich um Mal-Adaptation. Letztere hängt also auch von der räumlichen und temporalen Ebene ab.

Jede staatliche Intervention sollte außerdem daraufhin überprüft werden, welche Anreize bei den privaten Akteuren gesetzt werden. Vor allem Anreize zur Mal-Adaptation sollten dabei vermieden werden. Zu beachten ist ferner das schon erwähnte Phänomen des Moral Hazard (moralisches Wagnis beziehungsweise moralisches Risiko). Dies kann dann auftreten, wenn private Maßnahmen in der Erwartung unterlassen werden, dass der Staat handeln wird (zum Beispiel ein Bail-Out).

Ein schwieriges weiteres Themenfeld könnte man mit dem Begriff „Delta“ überschreiben. In der Ökonomie werden (infinitesimale) Änderungen oft mit diesem griechischen Buchstaben ( $\Delta$  oder  $\delta$ ) abgekürzt. Die Delta-Frage ist dabei für die Anpassung an den Klimawandel von hoher Bedeutung, denn sie beschreibt einerseits, inwieweit künftige Änderungen auf den Klimawandel zurückzuführen sind und andererseits, dass Anpassung an den Klimawandel häufig keine neuen Maßnahmen sondern eine Verstärkung vorhandener Maßnahmen mit sich bringt (Stichwort „Klimazuschlag“). Die folgende Tabelle aus Hallegatte et al. (2011) vermag dies zu illustrieren.

**Tabelle 2: Arten der Anpassung und Anpassungskosten (Hallegatte et al. 2011)**

	Aktuelles Risikoniveau		Gewünschtes Risikoniveau
Kein Klimawandel	1	Verringerung der Anpassungslücke	2
	Konstante Anpassung	Optimale Anpassung	Strikte Anpassung
Mit Klimawandel	3		4

Tabelle 2 zeigt die Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und dem Risikoniveau hinsichtlich Klimafolgen. Sofern in der aktuellen Situation das derzeitige Risikoniveau höher ist als gesellschaftlich gewünscht, besteht eine (aktuelle) Anpassungslücke (1 vs. 2). Werden Maßnahmen von der aktuellen Situation (ohne Klimawandel) aus implementiert, so kann die aktuell Lücke geschlossen werden (1 zu 2) und ein niedrigeres Risikoniveau erreicht werden. Mit Klimawandel hingegen kann eine Anpassungsmaßnahme auch zu einem gleichbleiben-

den Risikoniveau führen, d.h. es handelt sich um eine konstante Anpassung (1 zu 3), ohne eine Verbesserung der Risikolage gegenüber dem Status Quo. Bei optimaler Anpassung würde aber sowohl die (aktuelle) Lücke geschlossen als auch das künftige Klima berücksichtigt (1 zu 4). Entspricht die Risikolage bereits heute dem gewünschten Niveau, dann kann eine strikte Anpassung bewirken, dass dieses Niveau gehalten wird (2 zu 4). Folglich hängen sowohl die Maßnahmen und ihre Kosten als auch die Ergebnisse der Anpassung von der Ausgangssituation und vom Zielniveau ab. Es ist dabei methodisch oft kaum möglich, diese Deltas zu isolieren. In der Debatte um die Klimaanpassung spielen sie jedoch eine wichtige Rolle.

Ein weiterer Aspekt ist, dass der Nutzen vieler Anpassungsmaßnahme erst in fernerer Zukunft auftritt, während die Kosten bereits heute anfallen. Dies kann staatliches Eingreifen begründen, zumindest durch die Bereitstellung relevanter Informationen. Die Verbreitung von Informationen dürfte dabei vor allem auf der regionalen und lokalen Ebene Ziel führend sein.

Beim Timing von Anpassungsmaßnahmen hat die Literatur einige Bedingungen identifiziert, die für eine frühzeitige Anpassung erfüllt sein sollten (siehe zum Beispiel CEPS und ZEW 2010, OECD 2008). Demnach ist eine frühzeitige Anpassung sinnvoll, wenn

- die Anpassungskosten (und/oder die Betriebskosten) in der Zeit (wahrscheinlich) nicht abnehmen werden und es folglich keine Lernkurveneffekte gibt.
- die betreffende Maßnahme bereits kurzfristig hohen Nutzen einbringt.
- langfristige und/oder irreversible Schäden vermieden werden.
- es sich um langlebige Investitionen handelt, bei denen die rechtzeitige Berücksichtigung des Klimawandels zweckmäßiger erscheint als nachträgliche Änderungen.

Ein bisher wenig beachteter Aspekt sind die Chancen, die eine Anpassung an den Klimawandel und die damit verbundenen Technologien und Geschäftsmodelle mit sich bringen. Die Grundidee möglicher Vorteile für „Early mover“ wurde jedoch schon früh genannt (siehe zum Beispiel Defra 2004) und ist aus dem Bereich des Klimaschutzes hinlänglich bekannt. Es steht zu erwarten, dass dieser Gesichtspunkt künftig besser untersucht wird, um auch den Unternehmenssektor vermehrt in die Debatte um die Klimaanpassung einzubinden.

Vor einigen Erwägungen zur ökonomischen Beurteilung von Anpassungspolitik und -maßnahmen seien kurz die grundsätzlichen Anpassungsoptionen aufgeführt, die schon der IPCC (2001) aufgeführt hat:

- Tragen von Verlusten,
- Teilen von Verlusten,

- Änderung der Bedrohung,
- Verhindern von Effekten,
- Nutzungsänderungen,
- Standortverlegungen,
- Forschung und Entwicklung,
- Verhaltensänderungen durch Bildung, Information und Regulierung induzieren.

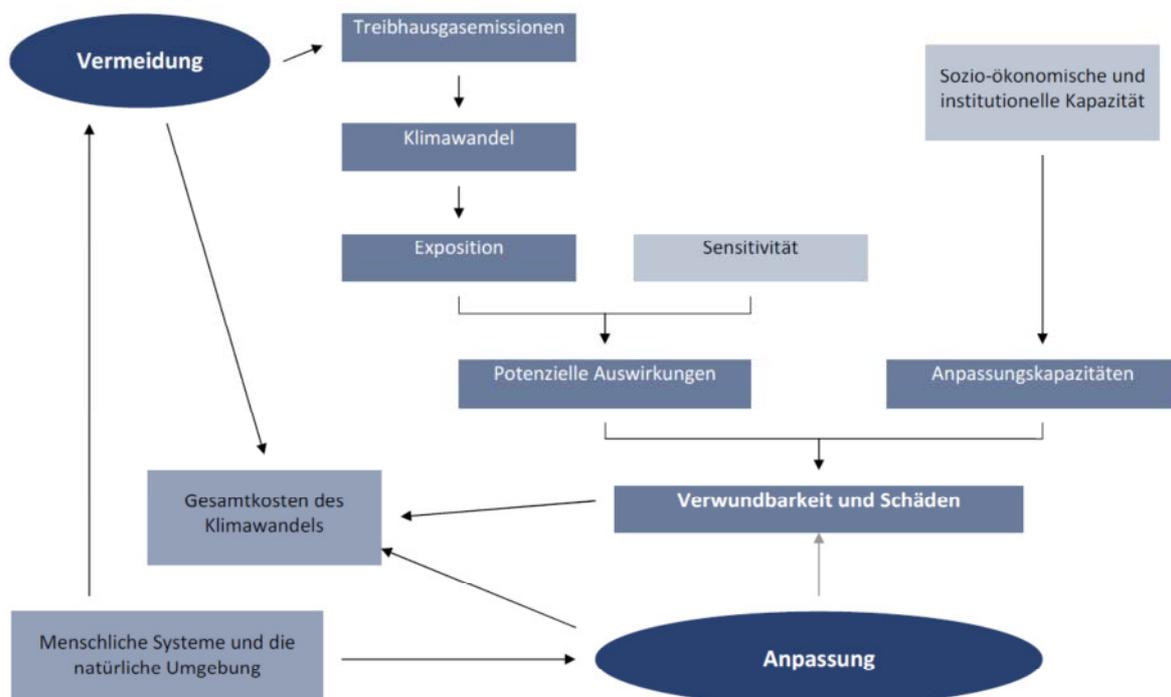
Die Europäische Umweltagentur EEA (2010) unterscheidet zudem Instrumente zur Anpassung an den Klimawandel wie folgt:

- Technologische Lösungen („grey“ measures),
- ökosystembasierte Optionen („green“ measures) und
- Verhaltens-, Management- und Politikansätze („soft“ measures).

### Modelle und Methoden

Ausgangspunkt der folgenden Überlegungen ist zunächst Abbildung 1, die die gesamten Kosten des Klimawandels verdeutlicht.

**Abbildung 1: Klimaschutz, Klimaanpassung und Kosten des Klimawandels**



Quellen: EEA (2008); eigene Darstellung.

Die gesamten Kosten des Klimawandels setzen sich also zusammen aus den Kosten für den Klimaschutz, für die Klimaanpassung und für die (verbleibenden) Schäden des Klimawandels. Ein optimaler Politikansatz bestünde nun darin, die Gesamtkosten zu minimieren, was jedoch praktisch utopisch erscheint. Auch in der ökonomischen Theorie befindet sich die gleichzeitige Untersuchung von Klimaschutz und Klimaanpassung noch in den Anfängen.

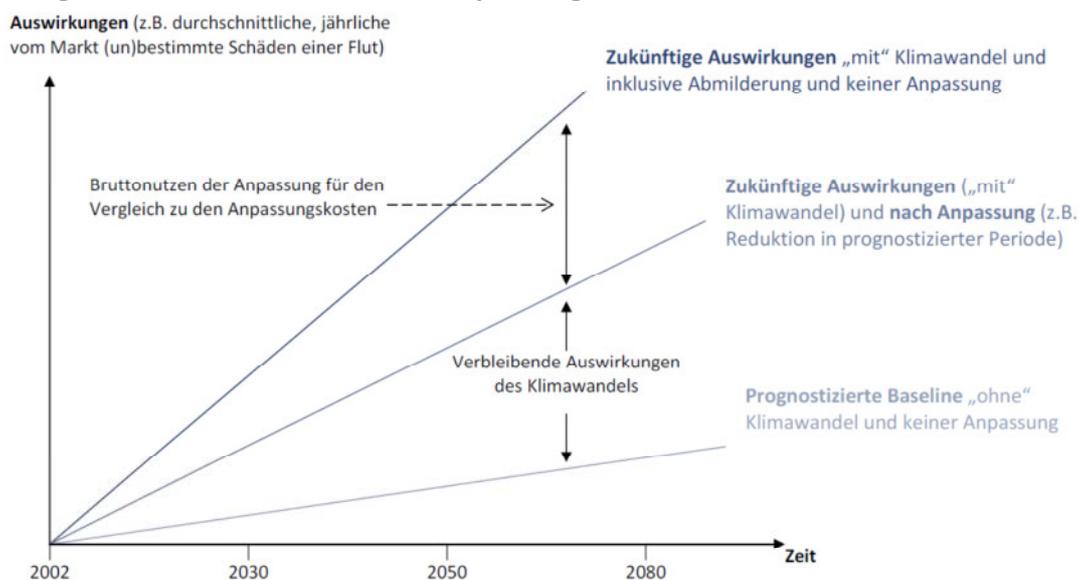
Die zentrale Herausforderung bei der Beurteilung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel besteht darin, die Kosten des Nicht-Handelns und die Kosten der Anpassung zu identifizieren und zu quantifizieren. Mit den Kosten des Nicht-Handelns sind dabei meist die Schäden des Klimawandels gemeint, die ohne Anpassung auftreten. Auch mit Anpassungsmaßnahmen fallen noch Schadenskosten an, da die Anpassung in der Regel die Schäden durch den Klimawandel nur mindert. Diese Restschadenskosten müssen ebenfalls in die Betrachtung einfließen. Der Wert einer Anpassungsmaßnahme setzt sich somit folgendermaßen zusammen:

*Wert (Anpassungsmaßnahme x) =*

*Kosten des Nicht-Handelns - Kosten der Anpassungsmaßnahme x - Restschadenskosten*

Ökonomisch rational ist es nun, diesen Wert zu optimieren. Maßnahmen mit einem negativen Wert sollten nicht in Erwägung gezogen werden. Die folgende Abbildung verdeutlicht den Begriff der Restschäden.

**Abbildung 2: Kosten und Nutzen der Anpassung**



Quellen: Boyd & Hunt (2006); eigene Darstellung.

Laut EEA (2007) sind bei der Schätzung beziehungsweise Quantifizierung der Schäden des Klimawandels und der Anpassungsmaßnahmen folgende Aspekte möglichst zu berücksichtigen:

- Schäden
  - Bewertung direkter und indirekter Effekte
  - Berücksichtigung des Zeithorizonts und angemessene Diskontierung
  - Beachtung von Unsicherheit und Irreversibilität
- Kosten der Anpassung
  - Methode der Bewertung und Beachtung indirekter Effekte
  - Berücksichtigung des Zeithorizonts und angemessene Diskontierung
  - Beachtung von Unsicherheit und Irreversibilität
  - Gegebenenfalls Verwendung von Szenarien
  - Timing von einzelnen oder mehreren Maßnahmen
  - Berücksichtigung von Co-Benefits

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass es keineswegs trivial ist, diese Aspekte gleichzeitig in einer Bewertung zu berücksichtigen. Allerdings hat sich mittlerweile eine Vielzahl von einzelnen Studien aber auch Projekten mit diesen Fragen beschäftigt. Zu den einflussreichsten Projekten gehören in Europa ADAM, Peseta, MEDIATION und ClimateCost.<sup>2</sup> Eine umfangreiche Übersicht von Bewertungsmethoden befindet sich in UNFCCC (2009), wobei dort auf IPCC (2007a) Bezug genommen wird. Auch in Dickinson (2009) und Zhu und van Ierland (2010) finden sich ausführliche Diskussionen und Darstellungen der verschiedenen Modelle und Methoden, die bisher auf verschiedener regionaler und sektoraler Ebene zum Einsatz gekommen sind. Die wichtigsten Ansätze aus jenen Aufstellungen sind:

- Kosten-Nutzen-Analysen (Cost-Benefit Analysis, CBA),
- Kosten- Effektivitäts-Analysen (Cost-Effectiveness Analysis, CEA),
- Multi-Kriterien-Analysen (Multi-Criteria Analysis, MCA),
- Risikomanagement-Methoden,

---

<sup>2</sup> Siehe die Webseiten    MEDITATION: <http://mediation-project.eu/>  
ADAM: <http://www.tyndall.ac.uk/adamproject/about>  
ClimateCost: <http://www.climatecost.cc/>  
Peseta: <http://peseta.jrc.ec.europa.eu/index.html>.

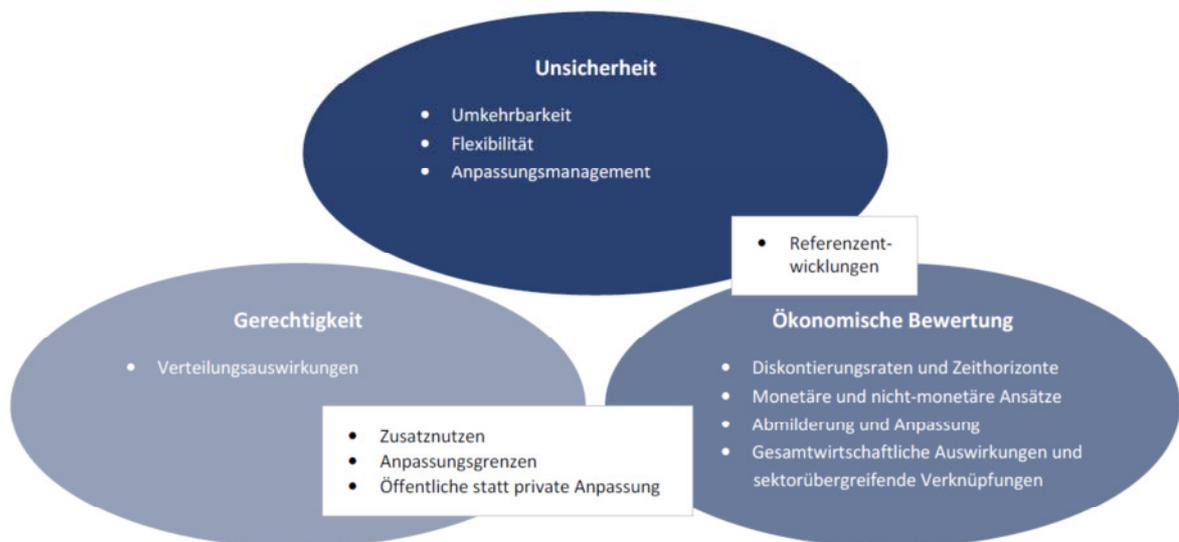
- Allgemeine (berechenbare) Gleichgewichtsmodelle (Computable General Equilibrium Models, CGEM),
- Optimierungsmodelle beziehungsweise integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models, IAM),
- Szenario- oder Optionswertmodelle, die speziell Unsicherheit adressieren.

Detaillierte Darstellungen der Methoden finden sich in der genannten Literatur.

Ein grundsätzliches Unterscheidungsmerkmal vorhandener Studien besteht darin, ob sie einen Top-down- oder einen Bottom-up-Ansatz verfolgen (siehe zum Beispiel OECD 2008, Gebhardt et al. 2011, Hallegatte et al. 2011). Top-down-Studien nehmen, basierend auf ökonomischen oder numerischen Modellen, Schätzungen für größere Regionen (Welt, Staatengruppen oder Länder) und/oder Sektoren vor, während Bottom-up-Studien auf niedrigerer Ebene ansetzen und teilweise die jeweiligen Ergebnisse aggregieren. Der Nachteil der Top-down-Studien liegt in der mangelhaften Aussagekraft auf regionaler und sektoraler Ebene, sowie in den vereinfachenden Annahmen. Sofern bei Bottom-up-Studien für einzelne Sektoren verschiedene Bewertungsmethoden verwendet werden, kann das einfache Addieren jedoch problematisch sein, zumal es Interaktionen und Interdependenzen außer Acht lässt. Alles in allem dominieren derzeit in der Literatur noch Top-down-Studien aus der CGEM- und IAM-Klasse. Ihre Ergebnisse sind allerdings für die regionale oder lokale Entscheidungsebene oft wenig hilfreich. Hier sind Bottom-up-Methoden eher geeignet.

Die klassische Methode für die Analyse öffentlicher Projekte ist die Kosten-Nutzen-Analyse. Hier werden die Kosten einer Maßnahme ihrem Nutzen, im Sinne von vermiedenen Schäden, gegenübergestellt. Eine Maßnahme ist dann umzusetzen, wenn ihr Nutzen höher ist als die Kosten der Maßnahme (bestehend aus den Investitions- und Betriebskosten). Es wurde aber zuvor schon gezeigt, dass es im Einzelnen eine Vielzahl von Problemen gibt – von der Bewertung, über bestehende Unsicherheiten bis hin zu Verteilungsfragen. Die folgende Abbildung soll die wichtigsten methodischen Fragen abschließend illustrieren.

**Abbildung 3: Methodische Fragen von Kosten und Nutzen der Anpassung**



Quellen: UNFCC (2009); eigene Darstellung.

### **Anpassung in Städten**

Auf die Bedeutung von Städten und großen Agglomerationen im Zusammenhang mit dem Klimawandel wurde bereits eingangs hingewiesen. Städte sind nicht nur Zentren großer wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aktivität und damit für einen Großteil der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich, sondern zugleich aufgrund ihrer Lage und der Konzentration von Menschen und Vermögen besonders anfällig für die Folgen des Klimawandels. Einen aktuellen Literaturüberblick liefern Hunt und Watkiss (2011). Sie zeigen, dass es sich um einen rasch wachsenden Forschungszweig handelt, der sich nicht zuletzt methodisch bedingt noch im Aufbau befindet. Die Mehrheit der betrachteten Quellen widmet sich dabei in entwickelten Ländern den Wirkungen von Extremereignissen (meist Fluten, Hitzewellen oder Infrastrukturschäden im Energiebereich). Empfohlen wird für quantitative Analysen aufgrund ihres hohen Ressourcenaufwandes eine Konzentration auf ausgesuchte Klimarisiken unter Hinzuziehung lokaler Stakeholder. Hallegatte (2008) schlägt in diesem Zusammenhang ein Konzept für die Analyse der Folgen von Extremereignissen in Städten vor. Demnach sollten sowohl die direkten als auch die indirekten Konsequenzen und gleichzeitig tangible und intangible Auswirkungen berücksichtigt werden.

### **3 Handlungsfelder und Vorgehensweise**

#### **3.1 Handlungsfelder**

Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS 2008) unterscheidet insgesamt 15 sogenannte Sektoren und Bereiche, in denen Klimaänderungen und die Anpassung an Klimafolgen von Bedeutung sind. Daschkeit und Renken (2009) fassen im fachlichen Orientierungsrahmen für Hamburg diese Sektoren zu Handlungsfeldern zusammen, wie zum Beispiel im Bereich Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz, führen diese nicht (explizit) mit auf, wie die Fischerei oder den Verkehr oder ordnen sie, wie bei den Querschnittsthemen Stadt- und Bauleitplanung sowie Katastrophenschutz, einzelnen Handlungsfeldern zu. Der fachliche Orientierungsrahmen zeigt zu erwartende Klimafolgen für Hamburg auf. Die Handlungsfelder werden dabei in die folgenden Kategorien eingeteilt:

- 1) Küsten- und Hochwasserschutz
- 2) Wasserwirtschaft
- 3) Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz
- 4) (Hafen-)Wirtschaft, Energie, Tourismus
- 5) Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen, Infrastruktur
- 6) Menschliche Gesundheit
- 7) Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst

Diese Handlungsfelder bilden die Grundlage dieses Gutachtens und spiegeln sich in den Abschnitten des vierten Kapitels wider.

#### **3.2 Vorgehensweise**

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf eine Wiedergabe des relevanten Wissens über ökonomische Aspekte der Anpassung an den Klimawandel. Hierfür wurde eine Reihe von Quellen ausgewertet. Allerdings erheben der Überblick und damit auch die Ausführungen im folgenden Kapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Stattdessen werden auf Basis der den Autoren vorliegenden Quellen die wichtigen Aspekte und Ergebnisse wiedergegeben und diskutiert. Zugleich wird damit gezeigt, wo und auf welche Weise die in Kapitel 2 angesprochenen Methoden und Modelle bisher zum Einsatz gekommen sind.

Für die Erstellung des Überblicks in Kapitel 3 wurde wie folgt vorgegangen. Die vorliegende Literatur wurde zunächst daraufhin geprüft, ob sie für Hamburg relevante Handlungsfelder

abdeckt. Sofern dies der Fall war, wurden nur Veröffentlichungen berücksichtigt, die sich mit den Kosten beziehungsweise Schäden des Klimawandels und/oder mit den Kosten von Anpassungsmaßnahmen beschäftigen. In diesem Zusammenhang werden dann sowohl die Methoden als auch die Resultate der betreffenden Studien aufgezeigt. Innerhalb der einzelnen Handlungsfelder erfolgt zur besseren Übersichtlichkeit eine weitere Untergliederung. Zunächst werden die Konsequenzen des Klimawandels in den Handlungsfeldern kurz skizziert. Anschließend erfolgt die Beschreibung der erwarteten Schäden und der damit verbundenen Kosten inklusive der jeweiligen Bewertungsmethode, sofern diese klar zu identifizieren ist. Danach werden Anpassungsmaßnahmen innerhalb des Handlungsfeldes sowie die dazu gehörigen Kosten aufgeführt. Sowohl in Bezug auf die Schäden beziehungsweise Schadenskosten als auch auf die Anpassungsmaßnahmen und ihre Kosten wird jeweils am Ende eines Unterabschnittes ein tabellarischer Überblick gegeben. Jeder Unterabschnitt schließt mit einer handlungsfeldbezogenen Zusammenfassung und stellt soweit möglich den Bezug zur Stadt Hamburg her. Einzig im Querschnittsfeld Katastrophenschutz wird von diesem Vorgehen abgewichen, da dort spezifische Schadenskosten nicht vorliegen, so dass nur auf die Kosten von Anpassungsmaßnahmen eingegangen werden kann.

## **4 Kenntnisstand zu den Handlungsfeldern in der Stadt Hamburg**

### **4.1 Küsten- und Hochwasserschutz**

#### **4.1.1 Auswirkungen des Klimawandels**

Europaweit lässt sich seit Anfang der 1990er Jahre ein deutlicher Anstieg der Flutschäden feststellen. Diese resultieren vorwiegend aus den sozioökonomischen Veränderungen insbesondere in den gefährdeten Gebieten. So stellen häufig Städte mit einem guten Wasserzugang attraktive Wohn- und Unternehmensstandorte dar, was zu einer Konzentration von Menschen und Vermögensgegenständen führt, die das Schadenspotential der Regionen deutlich erhöhen (Barredo 2008). Der Einfluss des Klimawandels auf die gestiegenen Kosten von Flutereignissen kann bisher nicht nachgewiesen werden (Barredo et al. 2009). Zukünftig werden die klimatischen Veränderungen allerdings eine zusätzliche Herausforderung für die flutgefährdeten Gebiete darstellen, insbesondere wird – unter anderem aufgrund des erwarteten Meeresspiegelanstiegs und der Zunahme an Intensität und Frequenz von Stürmen sowie einer Häufung von Starkregenereignissen – mit einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Sturmfluten und Hochwasserereignissen gerechnet. Es ist daher zu überprüfen, ob eine Anpassung der bestehenden Küsten- und Hochwasserschutzanlagen und -konzepte vorzunehmen ist, um das gewünschte Schutzniveau in den gefährdeten Gebieten aufrecht zu erhalten.

#### **4.1.2 Schadenskosten**

Kosten-Nutzen-Analysen zu verschiedenen Schutzmaßnahmen können dabei helfen, diese zu bewerten. Während die Kosten der Umsetzung einer Maßnahme meist offensichtlich sind, stellt sich die Abschätzung ihres Nutzens oft schwierig dar. Häufig werden die potentiell vermiedenen Überflutungsschäden als Maß für den Nutzen der Schutzmaßnahme angesetzt. De Kok und Grossmann (2009) modellieren die zu erwartenden Schäden von Hochwasserereignissen in dem deutschen Teil des Elbeinzugsgebiets. Der Einfluss des Klimawandels wird indirekt über die Betrachtung von Ereignissen mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Auf Basis der CORINE-Bodenbedeckungsdaten für Deutschland wurden den verschiedenen Landnutzungsarten jeweils ein monetärer Wert pro m<sup>2</sup> sowie eine Schadenfunktion in Abhängigkeit von der Überflutungshöhe unterteilt nach Gebäuden und Infrastruktur sowie Maschinen und Inventar zugeordnet. Daraus ergeben sich für ein 200-jähriges

Hochwasserereignis je nach Ausmaß des Deichbruchs Schäden in Höhe von 352 Mio. Euro bei einem 20m großen Bruch und bis zu 956 Mio. Euro bei 200m. Aufbauend auf diesem Szenario wurde der monetäre Nutzen verschiedener Schutzmaßnahmen anhand der Änderung der durchschnittlichen jährlichen Schäden ermittelt. Die vermiedenen Schäden stellen dabei den Nutzen der Maßnahme dar. De Kok und Grossmann (2009) betrachten den gesamten Flusslauf und zeigen, dass das Flutrisiko stromabwärts zunimmt, wenn stromaufwärts einseitig eine Deicherhöhung durchgeführt wird. Die Wirkung einer Ausweitung der Retentionsflächen entlang der Elbe erscheint dagegen sehr effektiv in Hinblick auf die vermiedenen Schäden im gesamten Einzugsgebiet. Die gesamten vermiedenen durchschnittlichen Schäden pro Jahr reichen von 390.000 Euro bei einer Erhöhung eines Großteils der Deiche am Oberlauf der Elbe in Sachsen (Kilometer 60 bis 180) bis 25,96 Mio. Euro bei der maximal möglichen Ausweitung der Retentionsflächen zwischen Kilometer 117 und 427 der Elbe.

Hallegatte et al. (2011) untersuchen am Beispiel der dänischen Stadt Kopenhagen die Kosten einer klimawandelbedingten Erhöhung des Sturmflutrisikos. Aufgrund der Unsicherheiten in den Klimaszenarien werden die Schadensszenarien an möglichen Meeresspiegeländerungen (von 0 bis 125 cm) ausgerichtet, die sich im Rahmen der gängigsten globalen Klimaszenarien bewegen (IPCC SRES Marker Szenarien A1, A2, B1, B2). Die Studie unterscheidet zwischen direkten und indirekten Schäden. Grundlage der direkten Schadensbemessungen sind die versicherten Vermögensgegenstände der Haushalte und Unternehmen in den flutgefährdeten Gebieten. Auf Grundlage von Erfahrungswerten früherer Ereignisse wie dem Hurrikan Katrina in den USA wird angenommen, dass die nicht versicherten Schäden (Infrastruktur und öffentliche Einrichtungen) 40 % der versicherten Schäden betragen. Bei derzeitigem Meeresspiegel würde ein 100-jähriges Sturmflutereignis direkte Schäden in Höhe von 3 Mrd. Euro verursachen. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm würde ein 100-jähriges Ereignis bereit zu Kosten in Höhe von 4,8 Mrd. Euro führen und bei 100 cm würden Kosten in Höhe von 8 Mrd. Euro entstehen. Hinzu werden die indirekten Kosten berechnet, die sich aus den Produktionsverlusten in der Folgezeit des Ereignisses ergeben. Dabei werden auf Basis eines dynamischen Input-Output-Modells Lieferverflechtungen zwischen den regionalen Unternehmen sowie deren Produktionskapazitäten berücksichtigt. Die Analyse zeigt, dass Ereignisse, die bei einem Pegelstand von unter 1,5 m (dies entspricht 3,1 Mrd. Euro an direkten Schäden) im Vergleich zum derzeitigen Normalpegel auftreten, nur sehr geringe indirekte Schäden verursachen. Über diesem Grenzwert steigen die indirekten Schäden sehr stark an und belaufen sich auf 2 Mrd. Euro bei einem Ereignis von 4 m über dem derzeitigen Mee-

resspiegel (15 Mrd. Euro direkte Schäden). Weiterhin werden die gesamten Schadenskosten bei verschiedenen Deichhöhen berechnet. Bei derzeitigem Meeresspiegel ergeben sich jährliche durchschnittliche Schadenskosten für Kopenhagen von weniger als 100.000 Euro bei einer Schutzhöhe von 180 cm. Ab 2 m sind keine entsprechenden Kosten mehr zu erwarten. Bei 25 cm Meeresspiegelanstieg belaufen sich die durchschnittlichen Kosten pro Jahr bereits auf 1 Million Euro, bei 50 cm auf 52 Mio. Euro und bei 100 cm auf 4,2 Mrd. Euro. Ab einer Schutzhöhe von 350 cm ergeben sich selbst bei einem Meeresspiegelanstieg von 125 cm keine Schadensereignisse mehr.

In einer Untersuchung von Ciscar (2009) werden im Gegensatz zu den bereits genannten Analysen explizit Klimaschäden ermittelt. Für aktuelle Binnenhochwasserereignisse geht die Studie von den ex-post ermittelten Schadenswerten aus und schätzt anhand von Klimamodellen, in welchem Umfang die Häufigkeit von Hochwasserereignissen einer bestimmten Kategorie (zum Beispiel 100-jährige Ereignisse) und die damit verbundenen Schäden zunehmen werden. Der Ansatz für die Schadensschätzung basiert dabei auf den potentiellen direkten Flutschäden, die sich aus Wasserstandshöhe und Landnutzungstyp ergeben. Diese Herangehensweise unterliegt einerseits vereinfachenden Annahmen (zum Beispiel einheitliche Schadensfunktionen), welche in Einzelfällen nicht der Realität entsprechen. Andererseits macht sie eine geographische Differenzierung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich. Bis 2080 schätzt Ciscar (2009) die zusätzlichen ökonomischen Schäden durch Hochwasser für Europa, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind, auf insgesamt 7,7 bis 15 Mrd. Euro. Dies würde einer Verdoppelung der jährlichen durchschnittlichen Schäden der Periode 1961 bis 1990 entsprechen.

Für Flutereignisse in Küstengebieten schätzt Ciscar (2009) zum einen die durch den Klimawandel zusätzlich betroffenen Personen in Europa. Die Analyse zeigt, dass die Zahl der Personen von 36.000 im Referenzszenario bis 2085 je nach Klimaszenario auf 775.000 bis 5,5 Mio. Personen ansteigen kann. Zum anderen werden in einem Basisszenario die zu erwartenden ökonomischen Schäden ohne die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen geschätzt. Je nach Meeresspiegelanstieg belaufen sich diese demnach bis 2080 auf 10,3 (geringer Meeresspiegelanstieg) bis 44,6 (starker Meeresspiegelanstieg) Mrd. Euro pro Jahr.

Weitere großräumige Analysen wurden von Parry et al. (2009), der Policy Research Corporation (2009) oder Sgobbi und Carraro (2008) zusammengestellt. Parry et al. (2009) schätzen den globalen Schaden durch Landverlust im Zuge des Klimawandels auf insgesamt 8 Mrd. US-\$. Für Europa schätzt Ciscar (2009) den klimawandelbedingten Landverlust auf 0,66 % der

europäischen Landfläche bis 2085, was 0,0049 % des BIP entspricht. Schätzungen von Sgobbi und Carraro (2008) gehen von Landverlusten an der italienischen Küste bis 2080 in Höhe von 0,2 bis 104 Mio. Euro aus. Die Policy Research Corporation (2009) ermittelte auf Grundlage einer Literaturlauswertung Kosten für Schäden an Vermögensgegenständen durch Überflutungen von Küstengebieten in Deutschland. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass diese ohne Anpassung an den Klimawandel 498,6 Mio. Euro pro Jahr betragen können.

Studie	Monetarisierte Schadenskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
de Kok und Grossmann (2009)	Schäden an Gebäuden, Maschinen und Inventar	Elbeeinzugsgebiet (Deutschland)	200-jähriges Hochwasserereignis	352 – 956 Mio. Euro
Hallegatte et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Direkte Schäden an Gebäuden, Maschinen und Inventar</li> <li>- Indirekte Schäden in Form von Produktionsverlusten</li> </ul>	Kopenhagen, Dänemark	Meeresspiegelanstieg 0 bis 125 cm	1 Mio. Euro (25 cm) bis 4,2 Mrd. Euro (100cm)
Ciscar (2009)	Schäden durch Flusshochwasser nach Landnutzungsarten	Europa	2080	7,7 Mrd. bis 15 Mrd. Euro
	Monetarisierte Schäden durch Fluten in Küstengebieten	Europa	2080	10,3 Mrd. bis 44,6 Mrd. Euro
	Landverlust in Küstenregionen	Europa	2085	0,0049 % des BIP
Parry et al. (2009)	Schäden durch Landverlust in Küstengebieten	Global	2030	8 Mrd. US-\$
Policy Research Corporation (2009)	Schäden in Küstenregionen allgemein	Deutschland	22,6 cm Meeresspiegelanstieg	498,6 Mio. Euro/a
Sgobbi und Carraro (2008)	Landverlust in Küstenregionen	Italien	2080	0,2 bis 104,6 Mio. Euro

#### **4.1.3 Anpassungsmaßnahmen und -kosten**

Van Ierland et al. (2007) stellen eine erste Abschätzung der Kosten von Klimaanpassungsmaßnahmen in den Niederlanden zusammen. Dabei werden vorwiegend die direkten Durchführungskosten einer Maßnahme berücksichtigt. Der Nutzen beziehungsweise der vermiedene Schaden der jeweiligen Maßnahmen werden für ein Szenario mit und ein Szenario ohne Klimawandel bestimmt, um zu einer effizienten Anpassung zu gelangen. Allerdings ist die Datenlage für eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse unzureichend. Exemplarisch lassen sich hier folgende Ergebnisse festhalten. Eine Ausweitung der Überflutungsflächen am Rhein

und an der Maas wird nach Angabe der Autoren insgesamt 5,5 Mrd. Euro kosten, worin die jährlichen Instandhaltungskosten bereits enthalten sind. Die Maßnahmen zur Verstärkung der Deiche belaufen sich für den Rhein auf 1,1 Mrd. Euro mit jährlichen Instandhaltungskosten in Höhe von 0,2% dieses Betrages. Für die Maas betragen die entsprechenden Kosten 800 Mio. Euro ebenfalls mit Instandhaltungskosten von 0,2% im Jahr.

Ergänzend zu der monetären Bewertung führen van Ierland et al. (2007) und in einer Folgestudie de Bruin et al. (2009) ein Ranking durch, um eine Einschätzung der Durchführbarkeit und des Stellenwertes einzelner Maßnahmen abzugeben. Dabei werden Widersprüche und Synergien zwischen den einzelnen Maßnahmen und mit dem Umfeld sowie die Bedeutung und Dringlichkeit berücksichtigt. Das Ranking beruht hauptsächlich auf Befragungsergebnissen von Fachleuten und damit individuellen und gebietsspezifischen Einschätzungen. Eine Übertragbarkeit der Resultate auf Hamburg wäre generell möglich.

Für die niederländischen Küstenregionen empfehlen van Ierland et al. (2007) die Vorhaltung von Flächen, um mit einem Szenario mit maximalem Meeresspiegelanstieg (85cm/100 Jahre + 10% Zunahme der Windgeschwindigkeit) in den nächsten 200 Jahren umzugehen. Die Kostenschätzungen für diese Maßnahmen wurden an bereits vorliegende Kostenschätzungen von großen Renaturierungsprogrammen angelehnt. Die angestrebte Größe der Rückhalteflächen beträgt 1000 ha. Unter Berücksichtigung von Kompensationszahlungen an Landwirte und der Kosten für die Anpassung und Verlegung der Deichlinie kommen die Autoren zu Kosten von insgesamt 0,3 bis 0,5 Mio. Euro pro Hektar. Die Kosten für 1 km eines neuen Deiches werden auf 6 Mio. Euro geschätzt. Eine weitere Schutzmaßnahme stellen künstliche Riffe in der Nordsee dar. Gleichzeitig können diese zu Renaturierungszwecken genutzt werden. Je nach Größe und Entfernung zur Küste werden die Kosten für ein künstliches Riff auf 0,5 bis 4 Mrd. Euro geschätzt.

Ciscar (2009) führt Kosten-Nutzen-Abwägungen für Küstenschutzmaßnahmen in Europa an. In einem Szenario mit geringem Meeresspiegelanstieg (9 cm) werden die Anpassungskosten auf 271,4 Mio. Euro pro Jahr und die Deicherhaltungskosten auf 153,5 Mio. Euro pro Jahr geschätzt. Die jährlichen wirtschaftlichen Schäden reduzieren sich dadurch von 10,3 auf 0,8 Mrd. Euro pro Jahr. Damit ergibt sich bis 2080 ein Netto-Nutzen der Anpassung von 9,2 Mrd. Euro pro Jahr. Für ein Szenario mit einem starken Meeresspiegelanstieg (88 cm) beläuft sich der Netto-Nutzen auf 39,8 Mrd. Euro pro Jahr. Hier kann mit einem relativ geringen Mitteleinsatz von geschätzten 2,6 Mrd. Euro pro Jahr für die Anpassung und 1,4 Mrd. Euro pro

Jahr für die Deicherhaltung der immense Schaden vermieden werden, der ohne Anpassungsmaßnahmen erwartet wird.

Parry et al. (2009) und Sgobbi und Carraro (2008) kommen zu einem ungünstigeren Kosten-Nutzen-Verhältnis. Parry et al. (2009) schätzen die Anpassungskosten im Küstenschutz je nach Maßnahme und Meeresspiegelanstieg global auf 13 bis 26 Mrd. US-\$ pro Jahr in 2030. Die Investitionskosten im Küstenschutz Italiens bis 2080 werden von Sgobbi und Carraro (2008) auf 1,5 bis 14,4 Mrd. Euro geschätzt, was 0,0006 bis 0,0062 % des BIP entspricht.

Die Policy Research Corporation (2009) ermittelte auf Grundlage von Literaturobserwungen die globalen Kosten der Anpassung an den Klimawandel mit Fokus auf Europa. Für Deutschland betragen die Anpassungskosten pro Jahr zwischen 50 (geringer Meeresspiegelanstieg) und 101 (hoher Meeresspiegelanstieg) Mio. Euro pro Jahr. Nach Großbritannien und Frankreich ist demnach in Deutschland mit den höchsten Anpassungskosten bezüglich Strandvorspülungen und Deicherhöhungen in Europa zu rechnen. Bis 2020 wird erwartet, dass der Netto-Nutzen der Anpassung in Europa zwischen 3,8 (geringer Meeresspiegelanstieg) und 4,2 (hoher Meeresspiegelanstieg) Mrd. Euro pro Jahr beträgt. Bis 2080 wird ein noch günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis erwartet. In Deutschland beträgt der erwartete Netto-Nutzen der Anpassung 46,9 Mio. Euro pro Jahr. Dieser ergibt sich aus den geschätzten Schadenskosten ohne Anpassung von 498,6 Mio. Euro pro Jahr, den Anpassungskosten von 50 Mio. Euro pro Jahr und den verbleibenden Schadenskosten nach der Anpassung von 401,7 Mio. Euro pro Jahr.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
van lerland et al. (2007)	Ausweitung der Überflutungsflächen am Rhein und an der Maas	Rhein und Maas Einzugsgebiet	-	5,5 Mrd. Euro
	Verstärkung der Deiche	Rhein, Maas (Niederlande)	-	1,1 Mrd. Euro (Rhein), 0,8 Mrd. Euro (Maas) + 0,2 % jährliche Instandhaltungskosten
	Ausweitung der Renaturierungsflächen in Küstengebieten	Niederlande	2200	0,3 bis 0,5 Mio. Euro/ha
	Deichneubau	Niederlande	2200	6 Mio. Euro/km
	Künstliche Riffe	Nordsee	2200	0,5 bis 4 Mio.

				Euro
Ciscar (2009)	Anpassung Küstenschutz	Europa	2085	271,4 Mio. Euro/a (9 cm) bis 2,6 Mrd. Euro/a (88 cm)
	Deicherhaltungskosten	Europa	2085	153,5 Mio. Euro/a (9 cm) bis 1,4 Mrd. Euro/a
Sgobbi & Carraro (2008)	Küstenschutz	Italien	2080	1,5 bis 14,4 Mrd. Euro
Policy Research Corporation (2009)	Strandvorspülung und Deicherhöhung an den Küsten	Deutschland	2080	50 bis 101 Mio. Euro/a

#### **4.1.4 Zusammenfassung**

##### **Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen**

Die Literaturlauswertung zeigt, dass eine Zunahme des Überflutungsrisikos von gewässernahen Gebieten im Zuge des Klimawandels erwartet wird. Für die Stadt Hamburg stellt sich hieraus eine besondere Herausforderung, da ein Großteil der flutgefährdeten Bereiche wirtschaftlich und gesellschaftlich genutzt wird und daher besonders exponiert ist. Deicherhöhungen und die Schaffung beziehungsweise Ausweitung von Retentionsflächen stellen mögliche Anpassungsmaßnahmen dar und stehen im Fokus der Analysen. Wie in der Studie von de Kok & Grossmann (2009) gezeigt, sollte bei der Durchführung einer Maßnahme der gesamte Flusslauf betrachtet werden, um zu vermeiden, dass andere Gebiete negative Auswirkungen erfahren.

##### **Ökonomische Betrachtung**

Die Schadenskosten werden in den betrachteten Studien unterschiedlich ermittelt. Bei kleinräumigeren Betrachtungen, wie beispielsweise für Kopenhagen (Hallegatte et al. 2011), werden häufig Landnutzungsklassen herangezogen. Diesen werden bestimmte Vermögenswerte zugeordnet. Diesen werden wiederum Schadensfunktionen in Abhängigkeit von der Überflutungshöhe zugeordnet, die in der Regel auf Erfahrungswerten von vergangenen Ereignissen basieren. In Kombination mit einem Überflutungsmodell für die untersuchte Region werden so spezifische Schadenswerte ermittelt. Länderübergreifende oder globale Schadensschätzungen in Küstengebieten werden häufig anhand von Landverlusten vorgenommen, denen ein bestimmter Wert zugeordnet wird. Die monetäre Schätzung indirekter Kosten findet nur

in wenigen Fällen statt. Diese können durch Arbeitskosten für Aufräum- und Säuberungsarbeiten, Lohneinbußen, Kosten alternativer Unterbringung, Ausfälle im Verkauf und in der Produktion, Verkehrsunterbrechungen (zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Unterhaltskosten für die Fahrzeuge) oder Gesundheitskosten (physische und psychische Gesundheit) entstehen.

Die Anpassungskosten werden in den Studien zum einen auf konkrete Maßnahmen bezogen. Zum anderen werden Hochrechnungen für landesweite oder länderübergreifende Kostenschätzungen angestellt. Einige Studien beinhalten bereits umfassende Kosten-Nutzen-Analysen. Dabei zeigt sich, dass eine effiziente Maßnahme, d.h. eine Maßnahme mit hohem Netto-Nutzen (Nutzen abzüglich Kosten und Residualschaden), die erwarteten Schadenskosten nicht zwangsläufig auf null reduziert, sondern mit einem Residualschaden einhergeht.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Monetarisierung der Schäden und Anpassungskosten im Hochwasser- und Küstenschutz im Vergleich zu anderen Bereichen relativ weit fortgeschritten ist. Allerdings beziehen sich die Analysen in der Regel lediglich auf den erwarteten Meeresspiegelanstieg, da noch erhebliche Unsicherheiten in den Klimaszenarien insbesondere bezüglich der zu erwartenden Windgeschwindigkeiten bestehen. Die Übertragbarkeit der Methoden und Resultate auf die Stadt Hamburg ist als relativ hoch anzusehen.

## **4.2 Wasserwirtschaft**

### **4.2.1 Auswirkungen des Klimawandels**

In der Wasserwirtschaft steht die Sicherung der Wasserversorgung im Mittelpunkt der notwendigen Anpassung an den Klimawandel. Dies betrifft sowohl die Trinkwasserversorgung als auch die Wasserbereitstellung für industrielle Produktionsprozesse oder die Bewässerung in der Landwirtschaft. Das am stärksten diskutierte Thema sind hierbei die quantitativ abnehmenden und qualitativ schlechteren Wasserressourcen und daraus entstehender Wassermangel, beziehungsweise -knappheit. Ergebnisse für Deutschland zeigen, dass dies nur in einzelnen deutschen Regionen als mögliche Klimafolge erwartet wird. Gerstengarbe et al. (2003) beschreiben eine zunehmende Trockenheit für Ostdeutschland und speziell Brandenburg. Die Änderung des Wasserdargebotes könnten dort gravierende Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt allgemein und auf die Wasserverfügbarkeit speziell haben. Es werden sowohl sinkende Grundwasserpegel als auch sinkende Pegelstände der Oberflächengewässer, unter anderem Talsperren erwartet. Daneben werden auch Konsequenzen für die Wasserqualität vorhergesagt, unter anderem da vorhandene Schadstoffe in einer geringeren Menge Wasser gelöst werden. Bei Oberflächengewässern kommen dazu auch noch höhere Wassertemperaturen im Sommer, die sich auf weitere Wasserparameter auswirken. Diese Veränderungen werden Auswirkungen auf verschiedenste volkswirtschaftlich bedeutende Sektoren (wie zum Beispiel die Versorgung mit qualitativ hochwertigem Trinkwasser, die landwirtschaftliche Bewässerung, aber auch die Erholungsfunktion von Gewässern) mit sich bringen.

Dem quantitativen Rückgang von Wasserressourcen stehen eine größere Nachfrage und eine höhere Verdunstung durch höhere Temperaturen entgegen. Vor allem in der Landwirtschaft wird ein höherer Bedarf für die Bewässerung von Flächen erwartet (auch durch eine höhere Evaporation der Pflanzen).

Weiterhin ist die Anpassung der Wasserinfrastruktur an vorhergesagte stärkere Niederschläge pro Ereignis und das häufigere Auftreten von Niederschlagsereignissen notwendig (zum Beispiel Flörke et al. 2011). Weiterhin dürfte die Anpassung der Wasserinfrastruktur infolge veränderter Niederschlagsmuster notwendig sein, vor allem der jahreszeitlichen Verschiebung von Niederschlagsereignissen.. Die Daten- und Informationslage zu ökonomischen Überlegungen ist in diesem Zusammenhang aber schwach und den Autoren liegen keine Studien mit dem expliziten Fokus auf Starkregen vor. Vielmehr findet dieser als Gefährdung entweder Berücksichtigung in sektoralen Studien, zum Beispiel für die Landwirtschaft oder

die Infrastruktur, oder er wird als wasserbezogenes Ereignis bei Binnenhochwässern subsumiert. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass Starkregen zwar ein extremes Ereignis sein kann, ohne Kombination mit anderen Gegebenheiten aber kein katastrophales Ausmaß annimmt. Trotzdem werden seine Konsequenzen aller Voraussicht nach künftig zunehmen, so dass sowohl private Anpassung, zum Beispiel Schutz des Eigentums oder von Produktionsstätten, als auch staatliche Anpassung, zum Beispiel in der leitungsgebundenen Infrastruktur oder öffentlichen Gebäuden, notwendig werden (siehe dazu die entsprechenden Abschnitte dieser Studie).

#### **4.2.2 Schadenskosten**

Titus (1992) schätzt die Kosten für eine Verknappung der Wassermenge in den USA für das Jahr 2060. Er nimmt dabei zuerst einen Preisanstieg durch die Wasserverknappung an (auf Basis von Nachfrage- und Angebotselastizitäten), den er mit dem erwarteten gesamten Wasserverbrauch multipliziert. Dieses Ergebnis wird als eine Komponente des gesamtwirtschaftlichen Schadens gedeutet, der klimawandelbedingt auftritt. Darüber hinaus wird auch von Wasserrationierungen in der Landwirtschaft ausgegangen, wodurch sich die Ernteerträge und damit die Erlöse verringern. Dieser Erlösrückgang wird als zweite Schadenskomponente einbezogen. Titus (1992) schätzt auf Basis dieser Berechnung für den Referenzzeitraum 1990 bis 2000 Gesamtkosten zwischen 6 und 8 Mrd. US-\$ pro Jahr, dies sind 10 bis 12 % der heutigen Wasserkosten ohne Klimawandel.

Hanemann und Dale (2006) berechnen für Kalifornien die Kosten eines Wassermangels in der Landwirtschaft. Dabei werden Minderungen von verfügbarem Oberflächenwasser zwischen 10% (die Hälfte der Jahre 2070-2099) und 68% (für ein Sechstel der Jahre, die besonders trocken ausfallen werden) gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 angenommen. In die Kosten gehen ein: Ernteauffälle durch nicht mehr landwirtschaftlich nutzbare Flächen und die zusätzlichen Kosten für einen Teil der Felder, die mit Grundwasser bewässert werden müssen. Die Schadenskosten für den Durchschnitt der Periode betragen 278,5 Mio. US-\$ bis 803 Mio. US-\$ pro Jahr verglichen mit den Erlösen in der Basisperiode. Ebenfalls werden die wirtschaftlichen Schäden für ein Jahr berechnet, in dem Wassermangel zu Einschränkungen der Wasserversorgung der Bevölkerung führt. Bei Hanemann und Dale (2006) erfolgt die Berechnung für ein Schadensereignis, d.h. für ein Jahr mit niedrigen Niederschlagsmengen. Der Verlust wird anhand einer sinkenden Konsumentenrente abgeschätzt (unter Annahme einer linearen Nachfragefunktion mit einer Preiselastizität von -

0.05). Das Ergebnis sind Schäden von 5 Mrd. US-\$ pro Jahr zwischen 2070-2099. Ohne die Wirkungen des Klimawandels würde unter den hydrologischen Verhältnissen aus der Basisperiode (1961-1990) und der erwarteten Bevölkerungszahl für die Jahre 2070-2099 ein Schaden von 1,7 Mrd. US-\$ entstehen. Darüber hinaus ist prognostiziert, dass Jahre mit vermindertem Niederschlag in den Jahren 2070-2099 verglichen mit der Basisperiode doppelt so häufig eintreten. Als Szenarien wurden regionalisierte Ergebnisse der B1 (2°C) und A1 (4,1°C) -Szenarien des HadCM3 Modells verwendet.

Schäden aufgrund der schlechteren Wasserqualität berücksichtigen verschiedene Autoren in dem sie Vermeidungskosten ermitteln. Kosten für die zusätzliche Reinigung in Abwasserbehandlungsanlagen dienen dabei als Basis. Das Ziel ist hierbei, die derzeitige Trinkwasserqualität zu erhalten. In einigen Studien werden die daraus resultierenden Kosten über eine Erhöhung der Abwasserabgabe getragen. Letzteres entspricht somit einer Anpassungsmaßnahme, deren Berechnungen unter dem Abschnitt Kosten von Anpassungsmaßnahmen im nächsten Abschnitt erwähnt wird.

Studie	Monetarisierter Schadenskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Titus (1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Preisanstieg durch Wasserverknappung</li> <li>- Erlösrückgang in der Landwirtschaft</li> </ul>	USA	2060	6-8 Mrd. US-\$/a, 10-12% der Wasserkosten ohne Klimawandel
Hanemann & Dale (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ernteauffälle durch nicht mehr landwirtschaftlich nutzbare Flächen</li> <li>- Höhere Kosten für Bewässerung mit Grundwasser</li> </ul>	Kalifornien	2070-2099	278,5 Mio. bis 803 Mio. US-\$/a
	Wassermangel für die Wasserversorgung der Bevölkerung (Berechnung für ein Schadensereignis)	Kalifornien	2070-2099	3,2 Mrd. US-\$/a

#### **4.2.3 Anpassungsmaßnahmen und -kosten**

Maßnahmen können in der Wasserwirtschaft auf der Angebots- und der Nachfrageseite ergriffen werden. Das Wasserangebot kann kurzfristig durch stärkere Pumpen, tiefere Brunnen, etc. erhöht werden. Allerdings ist hier darauf zu achten, dass die Nutzung der Wasserressourcen dem nachhaltig verfügbaren Wasserdargebot entspricht, d.h. kleiner ist als die Grundwasserneubildungsrate. Eine Übernutzung der Wasserressourcen führt langfristig zu Wasserknappheit und -mangel. Eine weitere Möglichkeit, das Angebot an Wasser zu erhö-

hen besteht darin, Wasser aus anderen Einzugsgebieten zu importieren. Ein Ausbau der Verknüpfungen verschiedener Wasserversorgungsgebiete wird voraussichtlich bereits aus nicht-klimawandelbedingten Gründen vorangetrieben und wird daher nicht im Rahmen dieser Studie untersucht (Ecoplan 2007, Tröltzsch et al. 2011).

Auf der Nachfrageseite kommen als Maßnahmen vor allem Wassersparen und das Recycling von Wasser in Frage. Dabei liegen Potenziale nicht nur beim Trinkwasserverbrauch des Einzelnen, sondern vor allem auch bei industriellen Prozessen, insbesondere der Kreislaufwirtschaft. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Bewässerung in der landwirtschaftlichen Produktion. Hier können andere Pflanzensorten, die Verwendung von Grauwasser und wassereffiziente Bewässerungsmethoden verwendet werden. Im Bereich der Wasserversorgung versickern beachtliche Mengen an Leitungs-, aber auch Abwasser. Ein Ausbau und regelmäßiges Instandhalten der Ver- und Entsorgungsnetze ist daher ebenfalls Teil der Anpassungsmaßnahmen (EEA 2012). Auch ökonomische Instrumente können die Effizienz der Wassernutzung steigern.

Neben der Wasserquantität sind auch Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Wasserqualität möglich, wobei sich beide Bereiche beeinflussen. Eine gängige Maßnahme, um der Verschlechterung der Wasserqualität entgegen zu wirken, ist die Verbesserung der Abwasserbehandlung.

Auf der Angebotsseite konnten monetarisierte Daten nur für die Auswirkungen der veränderten Wassergewinnung auf den Energieverbrauch gefunden werden. Mima und Criqui (2011) schätzen die Mehrkosten für einen erhöhten Energieverbrauch für veränderte Trinkwasseraufbereitung, zum Beispiel mittels weiterer Reinigungsstufen, oder durch stärkere Pumpenleistung bei tiefer liegendem Grundwasserkörper, für Europa auf 3,5 Mrd. Euro pro Jahr.

Parry et al. (2009) betrachten die Anpassung auf der Nachfrageseite. Sie fokussieren auf Instandsetzungsmaßnahmen am bisherigen System und das Vermeiden von Wasserverschwendung. Die Kosten dafür belaufen sich global auf 369 Mio. US-\$ pro Jahr und stehen einem vermiedenen Schaden in Höhe von jährlich 11 Mrd. US-\$ gegenüber. Eine Erläuterung der Berechnung erfolgt nicht.

Metroeconomica (2004) fertigten eine Fallstudie zu erhöhten Abwasserstandards (biochemischer Sauerstoffbedarf – BSB) an. Die Standards zielen auf eine geringere Belastung mit Schadstoffen ab, um die Wasserqualität auch bei Trockenperioden und geringeren Wasser-

pegeln zu gewährleisten. Die Kosten für die Anpassungsmaßnahme berechneten sie über die Opportunitätskosten für Reinigung des Abwassers in Abwasserbehandlungsanlagen. Die Berechnung wurde auf drei Szenarien angewandt (low, medium, high scenario) und ergab für den betrachteten Fluss Tavy zwischen 68.600 £ und 142.500 £ pro Jahr. Den gleichen Ansatz wählten ICF (2007), die zwei Szenarien für 20% und 50% strengere Standards für BSB und Ammonium berechneten. Für alle Abwasseranlagen in England und Wales würden die Kosten zwischen 120 und 370 Mio. £ betragen. Für ein Szenario, das in der Referenzentwicklung bereits Maßnahmen zur Zielerreichung der Wasserrahmenrichtlinie einbezieht, ergeben sich noch Zusatzkosten zwischen 60 und 150 Mio. £.

Wie bereits erwähnt, diskutieren auch Titus (1992) und Boyd und Walton (2006) die Vermeidungskosten einer verringerten Wasserqualität, d.h. es werden die Kosten zusätzlicher Abwasserbehandlungsverfahren berechnet, mit deren Hilfe die Wasserqualität auf dem ursprünglichen Stand gehalten werden könnte. Diese Kosten sind mit 15 bis 52 Mrd. US-\$ deutlich höher als die Kosten des Rückgangs der Versorgungsmenge.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Mima & Criqui (2011)	Mehrkosten für Energieverbrauch für veränderte Trinkwasseraufbereitung	Europa	2100	3,5 Mrd. Euro/a
Parry et al. (2009)	- Instandsetzungsmaßnahmen am bisherigen System (Investitionskosten) - Vermeiden von Wasserverschwendung (Investitionskosten)	Welt	2050	369 Mio. US-\$/a
Metro-economica (2004)	Opportunitätskosten für Abwasserstandards berechnet über Reinigung in Abwasseranlagen	Fluss Tavy	2020	68.600 - 142.500 £/a
ICF (2007)	Opportunitätskosten für Abwasserstandards berechnet über Reinigung in Abwasseranlagen	England & Wales	k.A.	120 - 370 Mio. £
Boyd & Walton (2006)	Kosten zusätzlicher Abwasserbehandlungsanlagen	Two regions: EA Southern, South Eastern Scotland	2050	15 - 52 Mrd. US-\$

#### **4.2.4 Zusammenfassung**

##### **Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen**

Die Analyse im vorliegenden Kapitel zeigt, dass in Deutschland in einigen Regionen die Quantität des Wasserdargebots durch den Klimawandel betroffen sein könnte. Zudem könnten deutschlandweit Probleme bei der Wasserqualität auftreten. Nach bisherigen Projektionen sind für die Stadt Hamburg und umliegende Gebiete keine Probleme bei der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung zu erwarten (Dannenberg et al. 2009, Zebisch et al. 2005, Gerstengarbe et al. 2003). Bei langen Trockenperioden sind aber Auswirkungen auf die Landwirtschaft wahrscheinlich, insbesondere auf flach wurzelnde Sorten. Eine mögliche Anpassungsmaßnahme sind effiziente Bewässerungsmethoden und die Vermeidung von Wasserverlusten im Versorgungsnetz. Darüber hinaus können trockenheitsresistente Pflanzensorten eingesetzt werden, die auch bei längeren Perioden mit geringen Niederschlägen ohne Bewässerung auskommen. Neben effizienten Bewässerungsverfahren ist hier auch die Sensibilisierung und Information der landwirtschaftlichen Betriebe relevant. Dies trifft ebenfalls auf den Wasserverbrauch in Industrieunternehmen zu. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr der Vernässung von Flächen durch erhöhte Niederschläge und höhere Grundwasserspiegel. Hierfür können in der Landwirtschaft ebenfalls angepasste Pflanzensorten verwendet werden. In urbanen Räumen ist evtl. eine Grundwasserregulierung notwendig, um Gebäude zu schützen. Verstärkte Trockenperioden sind für die Mitte dieses Jahrhunderts vorhergesagt (Regionaler Klimaatlas 2012, Flörke et al. 2011). Die Implementationsdauer für die Maßnahmen sind teilweise kurzfristig, zum Beispiel der Anbau von anderen einjährigen Sorten. Effiziente Bewässerungsmethoden sind eine No-regret-Maßnahme, die bereits kurzfristig beziehungsweise im Investitionszyklus umgesetzt werden sollte, da sie bereits heute positive Effekte auf den Wasserhaushalt zeigt.

##### **Ökonomische Betrachtung**

Sowohl für die Berechnung der Schadenskosten als auch der Anpassungskosten konnten in der Literatur mehrere Ansätze gefunden werden. Die Berechnung der Schadenskosten konzentriert sich auf die Analyse von steigenden Wasserpreisen beziehungsweise Wasserrationen und die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen, wobei die Landwirtschaft im Mittelpunkt steht. Die Monetarisierung erfolgt in der Landwirtschaft über den Ernterückgang und die Erlösminderung und somit entgangene Einnahmen in der Landwirtschaft. Schadenskosten für schlechtere Wasserqualität können über eine verstärkte Reinigung in Abwasser-

behandlungsanlagen berechnet werden. Diese Kostenkomponente nutzen andere Autoren aber als Kosten der Anpassungsmaßnahme. Diese werden dann zum Beispiel auch zur Beschreibung der Kosten von erhöhten Abwasserstandards verwendet. Darüber hinaus werden auf der Angebotsseite reale Investitionskosten für Instandsetzung und das Vermeiden von Wasserverschwendung beziehungsweise der erhöhte Energieverbrauch bei der (Trink-) Wassergewinnung und -aufbereitung berücksichtigt.

Insgesamt ist bisher nur ein Teil der Schäden und Anpassungskosten monetarisiert, auch da konkrete Klimaauswirkungen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind, zum Beispiel die Entwicklung der Grundwasserpegel. Die Studien greifen teilweise auf Fallstudien zurück, welche dann auf ganze Regionen hochgerechnet werden.

### **4.3 Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz**

#### **4.3.1 Auswirkungen des Klimawandels**

Derzeitige Studien zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft gehen von positiven und negativen Effekten aus. Eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre kann zu einem Düngeneffekt führen und sich somit positiv auf die Erntemengen auswirken (zum Beispiel Schaller und Weigel 2007). Bis 2050 ist in Deutschland auch mit höheren Durchschnittstemperaturen von bis zu 5,5°C zu rechnen (Regionaler Klimaatlas 2012). In der Landwirtschaft ist dadurch ein Anbau von wertvolleren Sorten, zum Beispiel im Weinanbau in Süddeutschland möglich, beziehungsweise kann bei höheren Temperaturen mit höheren Ernteerträgen gerechnet werden (vgl. unter anderem Stock 2005).

Negativ wirken sich allerdings die erwarteten stärkeren und häufigeren Extremwetterereignisse, wie Stürme und Niederschläge aus, die zu zunehmenden Ernteaufschlägen und somit Schäden in der Landwirtschaft führen.

Weiterhin negativ auf die Landwirtschaft, aber auch auf andere Handlungsfelder, wie Wasserwirtschaft und Forstwirtschaft, wirkt sich die klimawandelbedingte Veränderung der Ressource Boden aus (zum Beispiel Schaller und Weigel 2007, Umweltbundesamt 2008, Böhm 2008). Stärkere Extremniederschläge, die Verschiebung von Niederschlägen in den Winter und damit stärkere Trockenperioden sowie stärkere und zunehmende Stürme spiegeln sich in einer erhöhten Bodenerosion, einem veränderten Bodenstoffhaushalt und veränderten Zusammensetzung der organischen Bodensubstanz wieder. Der Klimawandel kann damit die Wasserspeicherfunktion des Bodens, die Reinigung von Oberflächenwasser durch Speicherung von Schadstoffen und die Bodenfruchtbarkeit beeinflussen.

Durch den Klimawandel und weitere globale Veränderungen werden auch Folgen für die Artenvielfalt und damit dem Natur- und Artenschutz erwartet. Grundsätzlich können sich Tier- und Pflanzenarten Veränderungen der Biosphäre anpassen. Es wird aber befürchtet, dass der Klimawandel kurz- und mittelfristige Veränderungen aufwirft, die in der kurzen Zeit von den Arten nicht kompensiert werden können, so dass sie unter den neuen Bedingungen nicht überlebensfähig sind (vgl. IPCC 2007b). Die größten Probleme werfen dabei voraussichtlich die erhöhten Durchschnittstemperaturen, die Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter und damit verbundene Trockenperioden, sowie Extremwetterereignisse auf. Des Weiteren wird ein Anstieg des Meeresspiegels mit Folgen für die Küstenökosysteme sowie eine Versalzung der Böden mit Folgen für Bodenorganismen und weitergehend Wäldern und Landwirtschaft erwartet. Vor allem als Folge der Temperaturerhöhung

zeichnet sich ab, dass sich die Lebensräume von Pflanzen und Tieren in Richtung Norden beziehungsweise in höhere Lagen verschieben. Laut BfN (2008) könnte es zu einer Verschiebung der Lebensräume um 200 bis 1.200 km nach Norden bis zum Jahr 2100 kommen. Dabei ändert sich die Artenzusammensetzung in Ökosystemen, insbesondere können invasive Arten verstärkt eindringen, mit komplexen Folgen für die Nahrungskette. Aber auch die auftretenden Schädlinge und Krankheiten verändern sich. Durch die veränderten Niederschläge sind vor allem Arten in Feuchtgebieten, d.h. Sümpfe, Moore und Auen, betroffen.

#### **4.3.2 Schadenskosten**

Für die Landwirtschaft findet die Bestimmung der Schäden beziehungsweise Nutzen der Anpassung hauptsächlich über Ernterückgänge oder -zuwächse und die daraus folgenden entgangenen oder potenziellen Einnahmen statt. Schäden in der landwirtschaftlichen Produktion werden über Simulationsmodelle abgeleitet, zum Beispiel das Pflanzenwachstumsmodell CERES.

Ciscar et al. (2009) berechnen in der PESETA-Studie die Folgen des Klimawandels für Europas Regionen anhand der Emissionsszenarien A2 und B2 sowie der Klimamodelle HadCM3 und ECHAM. Die Daten über den Zusammenhang von Klimaveränderungen und Pflanzenwachstum werden auf der Basis von Experimenten gewonnen. Die Autoren speisen in die Modelle unter anderem Daten zu veränderten landwirtschaftlichen Anbaugebieten, Ernteerträgen und landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsarten ein. Für die Region ‚Atlantic Central‘ in der auch Deutschland liegt, die aber auch noch weitere Staaten umfasst, berechnen die Autoren positive Auswirkungen für die Landwirtschaft bis 2050 (Basis 1961-1990) in Höhe von bis 0,02% des BIP.

Die Folgen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in den alten Bundesländern betrachtet Lang (2001). Seine Berechnung basiert auf Schattenpreisen, welche anhand einer Gewinnfunktion abgeleitet werden. In das Modell werden gering aggregierte Paneldaten der westdeutschen Landwirtschaftsbetriebe eingespeist. Lang (2001) schätzt einen um 12% ansteigenden Produktionswert bei einem +2,5°C-Szenario und sagt eine starke Veränderung der angebauten Sorten voraus.

Auf die Auswertung von Vergangenheitsdaten beziehen sich Zebisch et al. (2005). Die Daten für Ernteauffälle basieren auf der Hitzewelle des Jahres 2003 und stellen somit Schäden durch Trockenheit dar, für die Ertragseinbußen von ca. 12% berechnet werden.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2009) berechnet die Klimawandelfolgen auf die Erträge in der Landwirtschaft. Dabei werden nach der WEREX-Modellierung regionalisierte Daten der globalen Klimasimulation ECHAM5 (basierend auf Emissionsszenario A1B) verwendet. Die erwarteten Veränderungen werden mit Hilfe des Modells YIELDSTAT für die Hauptfruchtarten (Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps, Silomais) für den Zeitraum bis 2050 abgebildet. Die Ertragsstatistik von 1992-2007 dient als Referenz. Der wahrscheinliche Fortschritt, unter anderem in der Pflanzenzüchtung und der Agro-Technologie, wird ebenfalls einbezogen. Die Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes bezieht die Berechnung anhand der Ergebnisse des FACE-Experiments des Johann Heinrich von Thünen-Instituts Braunschweig (vTI) ein. Die Ergebnisse zeigen, dass Szenarien ohne Düngungseffekte zu Ertragsrückgängen zwischen 5 und 10 % führen können. Bei Einbezug des Düngungseffekts und des erwarteten Fortschritts werden vor allem für Winterweizen und Winterraps positive Ertragsentwicklungen erwartet. Ähnlich geht Hamilton (2006) bei seiner Berechnung der potenziellen Veränderungen der Anbauerträge für verschiedene Regionen Großbritanniens vor. Er verwendet das Ernteertragsmodell CropSyst und ermittelt die entgangenen Einnahmen anhand realer Einkommen, wobei er für die Einkommen konstante Preise und Kosten annimmt.

Kempfert und Kremers (2009) betrachten die gesamtwirtschaftlichen Kosten durch Veränderungen im Obstanbau. Sie beziehen veränderte durchschnittliche Temperaturen und Niederschlagsänderungen ein. Um die entgangenen Schäden zu projizieren, verwenden sie das Konzept der Schadenskoeffizienten, welches in ein allgemeines berechenbares Gleichgewichtsmodell (CGE) Modell eingeht. Dadurch ist eine Unterscheidung zwischen ökonomischen Entwicklungen und konkreten Klimaauswirkungen möglich. Das Klimawandelszenario wird dann einem Basisszenario gegenüber gestellt. Kempfert und Kremers (2009) führen ihre Berechnung für den Apfelanbau im Alten Land durch und kommen zu dem Ergebnis, dass dieser Anbau weiterhin wirtschaftlich betrieben werden kann und eher positive Auswirkungen auf die Ernteergebnisse zu erwarten sind.

Studien, die direkt auf Klimafolgen einer erhöhten Bodenerosion abzielen, existieren nur sehr vereinzelt. Für die Bestimmung der Bodenerosion werden verschiedene Klimamodelle verwendet, zum Beispiel HadCM3 oder das regionale Klimamodell WETTREG. Diese lassen sich mit Erosionsmodellen, zum Beispiel das WEPP-CO<sub>2</sub>, verknüpfen (O'Neal 2005). Experimente und Freilanduntersuchungen, wie die FACE-Experimente, dienen zur Bestimmung von Erosionsraten (zum Beispiel Schaller und Weigel 2007).

Pimentel et al. (1995) schätzen Schadenskosten durch Bodenerosion, gehen aber nicht auf die Klimawandelauswirkungen ein. Sie berechnen einen Ertragsrückgang im Maisanbau und beziehen Aktivitäten ein, die auf Produktivitätserhaltung abzielen. Diese Kosten gliedern sich in Offsite-Kosten, wie die Energiekosten zur Erstellung von Bewässerungssystemen, oder Onsite-Kosten, wie Mehrkosten zur Wassergewinnung bei stärkerer Trockenheit, oder Kosten für höhere Mengen an Düngemitteln. Der Ertragsrückgang wird auf Basis eines empirischen Modells unter Einbezug von Faktoren berechnet, die die Erosionsrate und Produktivität des Bodens beeinflussen. Als Resultat werden der Verlust an Wasser, Nährstoffen, Energie usw. durch Wind- und Wassererosion ausgewiesen. Pimentel et al. (1995) kommen zum Ergebnis, dass aufgrund der Bodenerosion jährliche Mehrkosten von 196 US-\$/ha bezogen auf den Zeitpunkt der Studie anfallen.

Darmendrail et al. (2004) analysieren anhand von Fallstudien ökonomische Kosten der Bodenerosion bedingt durch Wasser- und Winderosion und rechnen diese auf England & Wales hoch. Darmendrail et al. (2004) schätzen die Kosten in folgender Weise: 1) Schätzung der betroffenen Fläche, 2) Bemessung der Häufigkeit des Schadens, 3) Ermittlung der Schadensgröße. Ertragsänderungen und entgangene Einnahmen gehen in die Schadenskosten ein. Diese betragen für England & Wales circa 10 Mio. Euro pro Jahr, berechnet auf das Jahr 2000. Darüber hinaus werden Kosten für die Verschmutzung beziehungsweise Reinigung von Straßen, Gegenmaßnahmen gegen Wasserverschmutzung, Schäden an Grundstücken, etc. einbezogen. Die für das Jahr 2000 berechneten Offsite-Kosten betragen für England & Wales circa 600 Mio. Euro pro Jahr.

Die Europäische Kommission (2006) hat eine Studie zu Schäden aufgrund der abnehmenden Bodenfruchtbarkeit veröffentlicht. Allerdings bezieht sich auch diese auf die heutige Situation, so dass Klimawandelauswirkungen nicht berücksichtigt werden. Wie bei den anderen Studien werden verschiedene On- und Offsite-Kosten mit einbezogen, unter anderem Ernteauffälle, Kosten für Sedimententfernung und Schäden an Straßen und Grundstücken, Folgen für die Wasseraufbereitung und die Erholungsfunktion. Für 13 Staaten in Europa werden zwischen 0,7 und 14 Mrd. Euro an Schäden pro Jahr berechnet.

Harris et al. (2006) diskutieren verschiedene Ansätze zur Berechnung des Nutzens von Erosionsminderungsmaßnahmen, bspw. staatliche Finanzierungsinstrumente zum Vermeiden von Erosion. Als Option, die Kosten zu berechnen, werden hedonische Preise erwähnt, beispielsweise anhand verschiedener britischer Landpreise.

Für die Bestimmung von Klimawandelfolgen auf die biologische Vielfalt wird das Modell der klimatischen Nischen genutzt. Die klimatische Nische stellt dabei den mit dem Areal korrelierten Klimaraum dar. Um die Limitierung durch klimatische Faktoren herauszuarbeiten, werden Klimamuster und Verbreitungsmuster verschnitten. Für die Anwendung dieses Ansatzes bestehen mehrere vereinzelte Beispiele, zum Beispiel De Groot (2006), Thomas et al. (2004) und Schröter et al. (2004). Für Deutschland könnten dabei im „worst case Szenario“ bis 2080 in Nordwestdeutschland 25% und in Süd- und Ostdeutschland bis über 50% der Arten verloren gehen (vgl. Schröter et al. 2004). Diese Ergebnisse können als Basis für die Berechnung von Schadenskosten dienen. Allerdings ist eine konkrete Betrachtung von Schadenskosten im Zusammenhang mit Klimawandelfolgen bisher nur von Berry et al. (2006) vorgenommen worden. Die Autoren diskutieren drei Ansätze: Marktpreismethode, beobachtete Präferenzen und geäußerte Präferenzen. Als theoretisch am besten geeignete Methode empfehlen sie die Bewertung der Zahlungsbereitschaft anhand der kontingenten Bewertung. Allerdings liegen momentan noch wenige Ergebnisse solcher Bewertungsmethoden vor, die sich unmittelbar auf den Bereich Anpassung und Biodiversität übertragen ließen.

Deshalb nutzen Berry et al. (2006) Opportunitätskosten. Sie gehen anhand von Wiederherstellungskosten vor und berechnen für verschiedene Szenarien für Großbritannien und für das Jahr 2080 Kosten zwischen 1,4 und 2,5 Mrd. £. Im BfN-Projekt „Biodiversität und Klimawandel“ werden ebenfalls Zahlungsbereitschaften verwendet: zum einen für die Bewertung der auf der Insel Sylt erfassten Erholungsleistung, zum anderen für die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen.

Brander et al. (2011) berechnen die Schadenskosten durch klimawandelbedingt verringerte Feuchtgebiete. Die Autoren schlagen eine Methodik vor, welche die verlorene Fläche eines Feuchtgebietes mit dem lokalen Wert pro Hektar kombiniert. Diese Werte pro Hektar werden über eine meta-analytische Wertefunktion für ein konservatives Szenario und ein Klimawandel-Szenario berechnet. Beide Szenarien beziehen sich auf das Jahr 2050. Aufgrund der zurzeit fehlenden Datenbasis wurde der Werteparameter eines Feuchtgebietes in Großbritannien für alle Feuchtgebiete verwendet. Die Autoren nehmen für alle Länder einen 8%igen Verlust an Feuchtgebieten an und berechnen, zum Beispiel für Deutschland einen Verlust in Höhe von 95 Mio. Euro in 2050 im Vergleich zum Jahr 2000.

Studie	Monetarisierte Schadenskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Ciscar et al. (2009)	Einnahmeveränderung aufgrund veränderter Ernten	Europa	2050	Anstieg bis 0,02% des BIP
Lang (2001)	Schattenpreise für landwirtschaftliche Produktion	Westdeutschland	+ 2,5°C Szenario	Anstieg des Produktionswerts um 12%
Zebisch et al. (2005)	Ernteauffälle basierend auf Vergangenheitereignissen	Deutschland	2003	Ertragseinbußen bis zu 12 %
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2009)	Entgangene Einnahmen, Veränderte Erträge, auf Basis von Experimenten und Pflanzenwachstumsmodell YIELDSTAT	Sachsen	2050	Ertragsrückgänge zwischen 5 und 10% (ohne Düngereffekt)
Hamilton (2006)	Schadenskosten anhand realer Einkommen, auf Basis Modell CropSyst	Großbritannien	2080 (auch 2020, 2050)	Rückgang von 48,8 - 294,1 Mio. £/a
Kemfert & Kremers (2009)	Schadenskosten für Obstanbau in Norddeutschland, Ernteeinnahmen	Altes Land	2050	Positive Auswirkungen
Pimentel et al. (1995)	- Entgangene Einnahmen, Ertragsrückgang bei erhöhter Bodenerosion - Kosten für Produktivitätserhalt (Bewässerung, etc.)	USA	heute	Mehrkosten von 196/ha US-\$
Darmendrail et al. (2004)	- Entgangene Einnahmen - Kosten für Reinigung Straßen, Schäden Grundstücke, etc.	England & Wales	2000	Ertragsrückgang: ca. 10 Mio. Euro/a weitere Kosten: 600 Mio. Euro/a
Europäische Kommission (2006)	- Entgangene Einnahmen - Kosten für Reinigung Straßen, Schäden Grundstücke, etc.	13 europäische Staaten	heute	0,7 - 14 Mrd. Euro/a
Berry et al. (2006)	Wiederherstellungskosten	Großbritannien	2080	1,4 - 2,5 Mrd. £/a
Brander et al. (2011)	Wert verlorene Fläche eines Feuchtgebietes mit dem lokalen Wert per Hektar	Deutschland	2050	95 Mio. €

### 4.3.3 Anpassungsmaßnahmen und -kosten

Eine Anpassungsmaßnahme im Landwirtschaftssektor, die oft auch positive Effekte für die Bodenfruchtbarkeit oder den Wasserhaltung im Boden aufweist, kann die Weiterentwicklung und Nutzung von anderen, trockenresistenten oder hitzeresistenten Pflanzensorten sein. Weiterhin besteht ein großes Potential in der Anwendung von anderen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmethoden, zum Beispiel zur Verringerung von Bodenerosion. Beson-

ders hervorzuheben sind konservierende Bodenbearbeitungsmethoden, wie der Einsatz von Direktsaatverfahren (unter anderem Wurbs und Steininger 2011). Durch längere Trockenperioden wird der Anbau einiger Früchte nur noch profitabel sein können, wenn die Möglichkeit zur Bewässerung besteht (de Groot 2006). Ebenfalls gegen Bodenerosion wirkt eine durchgängige Bodenbedeckung, unter anderem durch verstärkten Anbau von Winterungen. Zudem wird die Einrichtung von Feldrainen oder Hecken empfohlen, so dass bei starken Niederschlägen Bodenmassen nicht in Gewässer und auf Infrastruktur, wie Straßen, gelangen können (vgl. Brand-Sassen 2004, SoCo Project Team 2009). Ebenfalls dient der Erhalt beziehungsweise Ausbau von unversiegelten Flächen und vor allem hydromorphen Böden der Erhöhung der Wasserrückhaltekapazität bei Extremniederschlägen. Des Weiteren wird bei diesen Maßnahmen der Wasserhaushalt über eine höhere Fähigkeit der Wasserspeicherung unterstützt.

Als Kosten der Maßnahme werden reale Investitionskosten, zum Beispiel für Bewässerungssysteme, für Winterungen oder die Einrichtung von Feldrainen verwendet (de Groot 2006). Brand-Sassen (2004) führt Kosten-Nutzen-Analysen von verschiedenen Einzelmaßnahmen gegen Bodenerosion durch. Dabei werden die Kosten als direkte und indirekte Kosten aufgeschlüsselt. Unter direkte Kosten fallen hierbei Kosten für das Anlegen von Hecken, für Maschinen und Anlagen, für Betriebsmittel und Arbeitszeit für Außen- und Innenausbau sowie dem Gartenbau. Unter indirekte Kosten fällt unter anderem der Ertragsrückgang aufgrund der Verschattung von Anbaufläche. Der Nutzen der Maßnahmen wird hauptsächlich über Opportunitätskosten bestimmt, wie zum Beispiel geringere Umbruch- und Neuansaatkosten bei Starkregenereignissen, oder über reale Kostenreduktion, wie verringerte Kosten für Pflanzenschutzmittel. Des Weiteren werden Ertragssteigerungen auf Basis von Marktpreisen angesetzt.

Für Maßnahmen im Bereich Artenschutz werden in den meisten Studien allenfalls mögliche Kostenkomponenten genannt, die für eine Kosten-Nutzen-Betrachtung in Frage kommen, zum Beispiel Landpreise bei der Einrichtung von Naturschutzzonen. De Groot (2006) schlägt zur Analyse der Anpassungsmaßnahmen Kostengrößen vor. Für die Kosten der Maßnahmen können reale Kostenkalkulationen von bereits durchgeführten Maßnahmen dienen. Allerdings weist der Autor darauf hin, dass diese Angaben erst noch erhoben werden müssen. Eine Veränderung der Landnutzung ließe sich über den Preis für den Ankauf von Land und über entgangene Einnahmen bei der Bewirtschaftung der Flächen abschätzen. Zur Bewer-

tung von Aufforstungen können die Kosten zur Bewirtschaftung der Fläche dienen, der Nutzen kann dabei über höhere Einnahmen für die Holzwirtschaft kalkuliert werden.

Berry (2007) betrachtet die weltweiten Kosten für die Einrichtung und das Management von Schutzgebieten. Für das BAU-Szenario (IPPC-Emissionszenarien A1B und B2) werden jährliche zusätzliche Kosten von 64,5 Mrd. US-\$, für das Mitigations-Szenario (B1) jährliche zusätzliche Kosten von 36 Mrd. US-\$ geschätzt.

Harris et al. (2006) entwickeln beziehungsweise empfehlen verschiedene Methoden zur Kostenberechnung von Artenschutzmaßnahmen. Dabei werden für den Nährstoffkreislauf Marktpreise empfohlen, für das Wasserrückhalte- und -reinigungsvermögen des Bodens Schadenskosten und Opportunitätskosten in Form von Kosten für Alternativaktivitäten im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Brand-Sassen (2004)	Direkte, indirekte Kosten, unter anderem entgangene Einnahmen für verschiedene Bodenschutzmaßnahmen	Deutschland	heute	liegen für viele verschiedene Einzelmaßnahmen vor
Berry (2007)	Kosten für die Einrichtung und das Management von Schutzgebieten	Welt	2030	36 – 64,5 Mrd. US-\$

#### **4.3.4 Zusammenfassung**

##### **Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen in Hamburg**

Die Landwirtschaft in Hamburg wird voraussichtlich durch Extremwetterereignisse, wie Starkniederschläge, Hagel, Trockenereignisse betroffen sein. Dabei wirkt sich eine Verschiebung der Niederschläge im Jahr und Trockenperioden auf höhere saisonale Schwankungen der Grundwasserstände aus. Die Wasserhaltefähigkeit der Böden und auch die Infiltrierbarkeit sind dabei von besonderer Bedeutung.

Auf dieser Basis ist es angezeigt, sowohl eine veränderte Sortenwahl anzustreben, hin zu trockenresistenteren Sorten als auch zu Sorten, die eine höhere Resistenz gegenüber Stürmen und Starkniederschlägen, zum Beispiel mit flexiblerem Stengel oder Pflanzen, die auf Staunässe tolerant reagieren. Weiterhin bieten sich zur Förderung der Wasserhaltefähigkeit der Böden konservierende Bodenbearbeitungsmethoden an, die noch dazu der Boden-

Fruchtbarkeit dienen und gegen Bodenerosion wirken. Ebenfalls können Feldraine oder Hecken an Feldrändern die Infiltration erhöhen. Ein Wasserrückhalt in der Fläche hat ebenfalls positive Effekte. Baulicher Wasserrückhalt kann in Trockenperioden für die Bewässerung genutzt werden. Neben konservierenden Bodenbewirtschaftungsmethoden können gegen Bodenerosion auch Winterungen auf die Felder aufgebracht werden oder Obstbäume mit Boden bedeckender Bepflanzung kombiniert werden.

Für den Erhalt der biologischen Vielfalt und den weiteren Naturschutz bietet sich ein nachhaltiges Waldmanagement an, das einen angepassten Baumartenmix, zum Beispiel trockenresistente Arten, umfasst. Ebenfalls ist, wenn möglich, eine Aufforstung und Begrünung voranzutreiben, zum Beispiel auch in Form von Grünzügen.

In der Landwirtschaft sind auch kurzfristige Maßnahmen wie veränderte Aussattermine möglich. Zu den mittel- und langfristigen Maßnahmen zählen zum Beispiel Pflanzenzüchtungen oder Landnutzungsänderungen, wie die Regeneration von Mooren (Olesen und Bindi 2004). Als No-Regret gelten Maßnahmen, die bereits heute aktuellen Probleme in der Landwirtschaft und im Naturschutz entgegenreten, zum Beispiel konservierende Bearbeitungsmethoden, die gegen Bodenerosion wirken, oder ein nachhaltiges Waldmanagement.

### **Ökonomische Betrachtung**

Bereits mehrere Studien beschäftigen sich mit Schadenkosten in der landwirtschaftlichen Produktion. Dem gegenüber sind explizit für Boden und Biodiversität bisher eher methodische Studien vorhanden. Vor allem im Bereich Artenschutz erlaubt die Datenlage keine Berechnung.

Die Schäden in der Landwirtschaft werden anhand von reduzierten Ernteerträgen und –ausfällen diskutiert (entgangene und zusätzliche Einnahmen). Als Basis dienen verschiedene Klimaszenarien und Pflanzenwachstumsmodell, wie CERES, CropSyst oder YIELDSTAT. In die Modelle werden meist Ergebnisse aus Feldversuchen eingespeist, unter anderem den FACE-Experimenten. Eine andere Herangehensweise basiert auf der Nutzung von Vergangenheitsdaten, zum Beispiel wird als Basis für zukünftige Klimaentwicklungen das Hitzeereignis 2003 angenommen und die in diesem Jahr entstandenen Schäden als Schadenskosten für Ende des 21. Jahrhunderts genutzt.

Für Schäden durch fortschreitende Bodenerosion konnten nur zwei Studien gefunden werden. Prinzipiell kann von Studien, die sich auf heutige Schäden beziehen, abgeleitet werden, dass Onsite-Kosten, wie Ernterückgänge oder Mehrkosten für Düngemittel auftreten, aber

auch ein Großteil der Schäden Offsite-Kosten sind, d.h. außerhalb der landwirtschaftlichen Produktion anfallen. Kostenkomponenten sind dabei der Schaden an Straßen, Grundstücken und Gebäuden, Mehrkosten für die Wasseraufbereitung oder die beeinträchtigte Erholungsfunktion.

Als Anpassungskosten werden meist reale Investitionskosten, zum Beispiel in der Landwirtschaft und für den Bodenschutz, verwendet. Angesetzt werden hier beispielsweise Kosten für zusätzliche Bewässerungsanlagen oder das Anlegen von Hecken. Weitere indirekte Kostenkomponenten sind der Ertragsrückgang durch eine geringere Anbaufläche und durch Verschattung von Anbauflächen, zum Beispiel bei Feldrainen. Die Reinigungsfunktion des Bodens kann anhand von Opportunitätskosten über Mehrkosten in der Trinkwasseraufbereitung abgeschätzt werden.

Für den Artenschutz erfolgt meist nur eine Diskussion von möglichen Kostenkomponenten. Berry (2007) beschäftigt sich mit Naturschutzkosten unter Klimawandel und setzt Kosten für zusätzlichen Landerwerb beziehungsweise die Pflege von geschützten Gebieten an. Für eine veränderte Landnutzung werden Aufforstungskosten und entgangene Einnahmen vorgeschlagen.

## **4.4 Wirtschaft, Energie und Tourismus**

### **4.4.1 Auswirkungen des Klimawandels**

Wirtschaftliche Tätigkeiten sind häufig in zweierlei Hinsicht mit dem Klimawandel verbunden. Einerseits tragen sie als Verursacher von Treibhausgasen selbst zum Klimawandel bei. Andererseits sind sie von klimatischen Veränderungen betroffen und müssen sich entsprechend anpassen, um negative Folgen, wie Betriebsunterbrechungen oder schlechtere Standortbedingungen, abzuwenden oder zu mildern. Die verschiedenen Wirtschaftssektoren sind durch den Klimawandel vor allem bei einer Zunahme von Extremwetterereignissen, wie Überflutungen, Stürmen oder Hitzeperioden, betroffen. Die Änderung der durchschnittlichen Klimaparameter wird dagegen nur für einen kleinen Anteil von Wirtschaftsbereichen von Bedeutung sein (Tröltzsch et al. 2011). Anpassungsmaßnahmen müssen in vielen Fällen von der Unternehmensseite durchgeführt werden. Die Motivation hängt damit von der unternehmensspezifischen Verwundbarkeit und der Anpassungskapazität ab. Die Anpassung kann zum Schutz der Produktionsfaktoren stattfinden sowie der Verbesserung der Versorgungssicherheit im Bereich Transport, Wasser und Energie dienen (an dieser Stelle sei auch auf das Handlungsfeld Infrastruktur verwiesen). Die Energiebranche nimmt eine Schlüsselfunktion für die Bevölkerung und die Wirtschaft ein. Um weitreichende Auswirkungen eines Ausfalls der Energieversorgung zu vermeiden, ist die Kenntnis über mögliche Klimafolgen und eine entsprechende Anpassung der Branche an den Klimawandel besonders angezeigt. Probleme, die sich im Zusammenhang mit dem Klimawandel verschärfen könnten, beziehen sich sowohl auf die Energienachfrage als auch die Energieversorgung. Die Energieversorgungssicherheit könnte durch zunehmende Hitze- und Trockenperioden in den Sommermonaten aufgrund einer damit einhergehenden Verknappung des Kühlwassers infolge geltender Umweltschutzregelungen gefährdet sein. Hiervon wären insbesondere konventionelle Energieerzeuger, wie Atom- und Kohlekraftwerke, betroffen, deren Produktion ohne Kühlwasser ausfallen würde. Ein Stromausfall kann abhängig von der Dauer und den betroffenen Bereichen immense wirtschaftliche Schäden zur Folge haben. Außerdem müssen bei der Kostenschätzung die Folgewirkungen, beispielsweise der Produktionsausfall in den betroffenen Sektoren berücksichtigt werden, die in Abhängigkeit von der Wirtschaftsstruktur zwischen einzelnen Regionen stark variieren können.

#### **4.4.2 Schadenskosten**

Überflutungsereignisse oder Stürme können zu einer Beschädigung von Produktionsgebäuden und -anlagen sowie an der Verkehrsinfrastruktur führen. Die Folge solcher Schadensereignisse ist oft eine Unterbrechung von Produktionsprozessen, die weitreichende Konsequenzen haben kann, wenn es beispielsweise zu Lieferschwierigkeiten kommt und somit auch nicht direkt von der Katastrophe betroffene Unternehmen ihre Produktion einschränken müssen. Es gibt zahlreiche Studien, die sich mit den Kosten von vergangenen Wetterextremen, wie Stürmen oder Überflutungen, für einzelne Wirtschaftsbereiche beschäftigen (Berlemann und Vogt 2007, Kreibich et al. 2007 und andere). In einigen Untersuchungen werden auch die indirekten Kosten geschätzt, wie in der Analyse der Kosten nach dem Hurrikan Katrina im US-Bundesstaat Louisiana (Hallegatte 2008), in der die indirekten Bruttowertschöpfungsverluste durch Produktionsunterbrechungen explizit Eingang in die Berechnungen finden. Andere Studien beschäftigten sich mit den Kosten eines Ausfalls kritischer Infrastruktur, wie zum Beispiel nach dem Stromausfall im Jahr 2003 an der Grenze von Kanada und den Vereinigte Staaten (ELCON 2004). Der Einfluss des Klimawandels auf zukünftig zu erwartende Schadenshöhen wird in diesen Studien allerdings nicht untersucht.

Die Studie von Stern (2006) versucht auf Grundlage einer Literaturlauswertung die Klimafolgen für die Wirtschaft zu quantifizieren. Sie geht dabei hauptsächlich auf Schäden an Gebäuden und Produktionsanlagen ein. Als Bemessungsgrundlage werden zu großen Teilen Versicherungssummen zu Grunde gelegt. Die Studie nimmt mit Bezug auf Nordhaus (2006) an, dass ein Anstieg von 5 bis 10% der Windgeschwindigkeiten von Wirbelstürmen und Taifunen in den USA eine Verdoppelung der Schadenskosten mit sich bringt. Diese Kosten würden dann bei 0,13% des BIP pro Jahr liegen. Welcher Teil der Schäden jeweils auf Industrie und Gewerbe entfällt, wird nicht ausgewiesen.

Der IPCC (2007a) weist auf die möglichen negativen Auswirkungen von Hitzeperioden hin. Ohne ausreichende Kühlung wären eine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit sowie eine Verringerung der Produktivität der Arbeitnehmer denkbar. Außerdem könnte die Funktionsfähigkeit von Maschinen und Produkten eingeschränkt werden. Diese Aspekte greifen auch Hübler und Klepper (2007) in ihrer Studie zu den Folgen des Klimawandels bis 2100 in Deutschland auf. Es zeigt sich in allen drei verwendeten Klimaszenarien eine Zunahme der Tage mit starker oder extremer Hitzebelastung von 1 bis 25 Tagen gegenüber dem Zeitraum 1971-2000. Die zusätzliche Belastung an den Küsten ist am geringsten, während in der Mitte und in Süddeutschland die Anzahl der Hitzetage deutlich ansteigen. Zudem ist ein Stadtef-

fekt (Hitzeinseleffekt) zu erkennen. So wird beispielsweise für Hamburg je nach Szenario eine Zunahme der Hitzetage bis 2100 von 3 bis 9 Tagen pro Jahr erwartet. Aufbauend auf den Simulationen schätzen die Autoren die hitzebedingte Veränderung der Leistungsfähigkeit des Menschen und daraus resultierende Einbußen der Wertschöpfung. Die Bewertungen finden dabei auf Basis des derzeitigen Sozialproduktes statt. Es werden also keine Einkommensänderungen berücksichtigt. Da die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Arbeitsproduktivität stark von der Art der Tätigkeit, dem Arbeitsplatz und vielen weiteren Faktoren abhängen, und zudem Anpassungs- und Rückkopplungseffekte im wirtschaftlichen Prozess nicht berücksichtigt werden, handelt es sich bei den Ergebnissen der Studie um eine grobe Abschätzung der Größenordnung der Effekte. Es werden konservative Parameter von 3% und 12% Leistungsminderung bei starker (über 26°C) und extremer Hitze (über 32°C) unterstellt. Im Vergleich zu einem Jahr ohne Hitzetage würde das Sozialprodukt bei dieser Leistungsminderung um 0,12% bis 0,48% niedriger ausfallen (Hübler und Klepper 2007). Eine Übertragbarkeit dieser Methode auf einzelne Regionen ist generell denkbar. Voraussetzung wären Klimaszenarien anhand derer die Entwicklung der Anzahl der Hitzetage abgeschätzt werden kann.

Im Bereich der Energieversorgung gibt es unterschiedliche Ergebnisse zu den Kosten nicht gelieferter Energie infolge eines Stromausfalls. De Groot et al. (2006) gibt für die Niederlande einen Wert von 30 Euro pro nicht ausgelieferter kWh bei einem Stromausfall von über acht Stunden an. Der entsprechende Wert von van Ierland et al. (2007) beträgt 30 bis 50 Euro/MWh (0,003 bis 0,005 Euro/kWh). Letztere kommen so zu dem Ergebnis, dass durch einen Stromausfall, der 10% der Energieversorgung in den Niederlanden betrifft, Kosten in Höhe von 6 bis 11 Millionen Euro entstehen. Watkiss et al. (2006) schätzen die Kosten eines Stromausfalls in Großbritannien auf 2 £/kWh (etwa 2.400 Euro/MWh) am ersten Tag und auf 1 £/kWh für die Folgetage. Untersuchungen nach dem Stromausfall im Jahr 2003 in der Stadt New York ergaben, dass die direkten Kosten (unter anderem bezogen auf Produktionsunterbrechung und Löhne) 0,66 Euro/kWh betragen und sich die indirekten Kosten (Sekundäreffekte der direkten Kosten) auf 3,45 Euro/kWh summierten. Hierbei wird unter anderem davon ausgegangen, dass der Wert von Energie für den Konsumenten in etwa hundertmal so hoch ist wie der Verkaufspreis der Energie (ICF Consulting 2003).

Nicht nur die Energieproduktion, sondern auch die Infrastruktur zum Transport und der Verteilung der Energie muss sich an den Klimawandel und insbesondere an häufiger auftretende und heftigere Extremereignisse anpassen. Nach Eskeland et al. (2008) führte beispielsweise

der Wintersturm 2005 in Deutschland zu massiven Schäden an den Strommasten. Um das System an starke Stürme anzupassen, musste der Netzbetreiber (RWE) danach 28.000 Masten erneuern, was mit Kosten in Höhe von 500 Millionen Euro verbunden war. Ohne eine Anpassung der Freileitungen wird zudem mit einem größeren Durchhang aufgrund höherer Temperaturen und Windgeschwindigkeiten gerechnet (Tröltzsch et al. 2011).

Schließlich werden auf der Energienachfrageseite Änderungen erwartet. Langfristige Temperaturänderungen und insbesondere eine Zunahme von Extremwetterlagen, wie Hitze- oder Kälteperioden, könne zu einer Veränderung des Heiz- und Klimatisierungsbedarfs und somit zu Änderungen in der Energienachfrage führen. Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit dieser Thematik (vgl. unter anderem Dunkelberg et al. 2009, Wilbanks et al. 2008, Watkiss et al. 2006, Amato et al. 2005, Bosello et al. 2002). Die Studie von Watkiss et al. (2006) untersucht die Entwicklung der Energienachfrage bis 2080 in Großbritannien unter sozio-ökonomischen Veränderungen (basierend auf UKCIP-Szenarien) und dem Klimawandel. Die Autoren stellen fest, dass die Energieeinsparungen durch geringeren Heizbedarf in milderen Wintern, die zusätzlichen Ausgaben für die Kühlung von Gebäuden im Sommer in den von ihnen betrachteten Szenarien mehr als aufwiegen. Für 2050 wird somit sogar eine Verringerung der Energienachfrage durch den Privathaushalte sowie den Dienstleistungssektor um 3,3 bis 5% geschätzt. Eine Studie von Mansanet-Bataller et al. (2008) nimmt dagegen einen Zuwachs der Quote der Klimaanlage in Frankreich auf das amerikanische Niveau von 64% der Haushalte an. Dadurch würde die Energienachfrage im Land um 10 TWh pro Jahr steigen. Viele Studien, die sich mit der globalen und nationalen Entwicklung von Tourismusströmen beschäftigen, nutzen das Hamburg Tourism Model (siehe hierzu <http://www.fnu.zmaw.de/HTM.5681.0.html>). Neben Bevölkerungs- und Einkommensentwicklungen findet das Klima hier als erklärende Variable explizit Eingang in die Simulationen. Ein Vergleich der Simulationen mit und ohne Klimawandel liefert den Einfluss des Klimawandels auf die Anzahl der inländischen und internationalen Touristen in einem Land. Für Großbritannien ergibt sich so in der Studie von Watkiss et al. (2006) für die Zeiträume bis 2020 und bis 2050 eine geringere Zahl an Touristen im Szenario mit Klimawandel als im Szenario ohne Klimawandel. Bis 2080 wird dann allerdings ein positiver Einfluss des Klimawandels auf die Touristenzahlen und somit auch auf die Ausgaben, die die Touristen im Land tätigen, identifiziert. Auch London, als einer der Anziehungspunkte für Touristen in Großbritannien, wird sich einem starken Anstieg der Touristenzahlen gegenüber sehen. Allerdings verliert die Metropole Marktanteile an andere Regionen, wie beispielsweise Schottland. Ein Effekt, der

sich durch den Klimawandel noch verstärkt. Leider liefern Watkiss et al. (2006) keine Informationen, welche Faktoren diese Entwicklung maßgeblich beeinflussen.

Basierend auf dem gleichen Grundmodell zeigen die Ergebnisse von Bigano et al. (2006) eine globale Verschiebung der Touristenströme bis 2100. Nach ihren Simulationen werden kältere Länder, zu denen auch Deutschland zählt, von einem Zuwachs an inländischen sowie internationalen Touristen profitieren, während sich die Touristenzahlen in wärmeren Ländern sogar halbieren können. Berrittella et al. (2004) simulieren mit Hilfe eines Allgemeinen Gleichgewichtsmodells die Effekte des Klimawandels auf das BIP in Europa. Die Ergebnisse zeigen einen Rückgang von 0,1% im Vergleich zum Szenario ohne Klimawandel bis 2050. Ebenfalls basierend auf einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell schätzt Ciscar (2009) die Entwicklung der Übernachtungen und Tourismusaufgaben innerhalb Europas bis 2080. Für Mitteleuropa weisen die Simulationen für alle Klimawandelszenarien einen Effekt auf die Ausgaben der Touristen in dieser Region aus. Der Anstieg der Ausgaben reicht von 634 Mio. Euro bei einer Temperaturerhöhung von 2,5 °C bis 4,2 Mrd. Euro bei einer Temperaturänderung von 5,4 °C.

Studie	Monetarisierete Schadenskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Stern (2006)	Sturmschäden an Gebäuden und Produktionsanlagen	USA	-	0,13 % des BIP pro Jahr
Hübler & Klepper (2007)	Produktivitätseinbußen	Deutschland	-	0,12 % bis 0,48 % des Sozialprodukts
de Groot et al. (2006)	Nicht ausgelieferte Energie	Niederlande	-	30 Euro/kWh
van Ierland et al. (2007)	Nicht ausgelieferte Energie	Niederlande	-	30 bis 50 Euro/MWh
Watkiss et al. (2006)	Nicht ausgelieferte Energie	Großbritannien		£2/kWh (erster Tag), £1/kWh (Folgetage)
	Änderung der Energienachfrage	Großbritannien	2050	-3,3 % bis -5 %
ICF Consulting 2003	Nicht ausgelieferte Energie	New York, Stadt	2003	0,66 Euro/kWh bis 3,45 Euro/kWh
Mansanet-Bataller et al. (2008)	Änderung der Energienachfrage	Frankreich	-	10 TWh/a
Ciscar (2009)	Ausgaben der Touristen im Inland	Mitteleuropa Nord	2080	+634 Mio. Euro (2,5 °C) bis +4,2 Mrd. Euro (5,4 °C)

#### **4.4.3 Anpassungsmaßnahmen und -kosten**

Aus der Literaturrecherche ergeben sich keine Erkenntnisse über die Quantifizierung von Anpassungsmaßnahmen im Industrie- und Gewerbebereich. Mögliche Anpassungsmaßnahmen, die das IPCC (2007a) diskutiert, beziehen sich vor allem auf die Gebäude, beispielsweise eine Anpassung der Produktionsgebäude (Dachkonstruktion, Fundament), passive und aktive Kühlung als Antwort auf steigende Temperaturen oder auch die kostspielige Verlegung des Produktionsstandortes (IPCC 2007a).

Anpassungsmaßnahmen an die möglichen negativen Auswirkungen von Hitzeperioden auf die Leistungsfähigkeit der Arbeitskräfte werden von Hübler und Klepper (2007) diskutiert. Sie beziehen sich vor allem auf das Bauwesen. Zum einen werden einzelbauliche Maßnahmen aufgeführt, die sich beispielsweise auf Verschattung oder Dämmung von Gebäuden beziehen. Zum anderen werden auch stadtplanerische Anpassungsmaßnahmen angedacht, die teilweise nur langfristig und unter hohen Bau- und Planungskosten umsetzbar sind. Für eine Quantifizierung der Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen fehlen allerdings noch weitgehend Ansätze (Hübler und Klepper 2007).

Im Energiebereich werden in der Literatur verschiedene Lösungen diskutiert, um die Versorgung sicherzustellen. Zum einen könnte eine Anpassung der Vorschriften stattfinden, die eine höhere Temperatur für das zurückgeleitete Kühlwasser beziehungsweise für das genutzte Fließgewässer zulässt. Negative Effekte auf das Ökosystem in den Gewässern sind bei einer Bewertung dieses Instruments zu berücksichtigen, stellen sich allerdings als schwer quantifizierbar dar, so dass hierzu bisher keine monetären Werte vorliegen (van Ierland 2007). Eine andere Möglichkeit, die Kühlwasserverfügbarkeit für die Kraftwerke sicher zu stellen, wäre der Bau von Kühltürmen. Diese würden zu einer Sicherung der Energieversorgung beitragen. Neben dem Nutzen des vermiedenen Energieausfalls ist hier noch der indirekte Nutzen des abgewendeten Schadens am Ökosystem zu berücksichtigen, der durch eine Ableitung des Kühlwassers in die Fließgewässer entstehen würde. Die Kosten für den Bau von Kühltürmen werden von van Ierland et al. (2007) auf 55 Mio. Euro pro Kühlturm geschätzt. Zudem muss berücksichtigt werden, dass der Bau solcher Türme möglicherweise das Landschaftsbild beeinträchtigt und zu einer erhöhten Lärmbelastigung der Anwohner führt. Dies könnte die Grundstückswerte in dem betroffenen Gebiet verringern, was in eine umfassende Kostenrechnung einbezogen werden müsste. Zudem diskutierten van Ierland et al. (2007) die Kosten für den Bau widerstandsfähiger Windräder. Auf Basis einer Lite-

raturauswertung schätzen sie diese auf 10% der Bau- beziehungsweise Investitionskosten einer Windkraftturbine.

Anpassungsmaßnahmen auf der Energienachfrageseite scheinen ebenfalls notwendig. Diese beziehen sich überwiegend auf den Gebäudesektor. Die hier angestrebten Maßnahmen verringern zum einen die Vulnerabilität gegenüber einer unsicheren Energieversorgung. Zum anderen tragen sie häufig gleichzeitig zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bei, wodurch der Übergang zum Klimaschutz hier fließend ist. Zudem können Anpassungen in der Stadt- und Raumplanung dazu beitragen Hitzeinseln zu vermeiden und so den Energiebedarf für die Gebäudekühlung zu reduzieren (Bettgenhäuser et al. 2011). Der direkte Nutzen der Maßnahmen oder Instrumente, die diesem Ziel dienen, kann zum einen durch die sinkende Energienachfrage ausgedrückt werden. Für eine monetäre Bewertung könnte der Energieverbrauch von angepassten Häusern und konventionellen Häusern verglichen und mit Marktpreisen bewertet werden. Zum anderen könnte der Nutzen über vermiedene Ausfälle der Energieversorgung abgeschätzt werden (van Ierland et al. 2007). Einschätzungen zu den Kosten spezifischer Maßnahmen finden sich kaum in der Literatur. Van Ierland et al. (2007) schätzen beispielsweise den Gegenwartswert der Kosten für die Isolierung der vorhandenen Häuser (6,8 Mio.) für die Niederlande auf 23 Mrd. Euro. Sie schätzen die Kosten für den Bau eines Hauses nach Passivhausstandard zudem durchschnittlich um 10% höher ein als für ein konventionelles Haus.

<b>Studie</b>	<b>Anpassungskosten</b>	<b>Region</b>	<b>Zeitlicher Bezug</b>	<b>Ergebnisse</b>
van Ierland et al. (2007)	Bau eines Kühlturms	Niederlande	-	55 Mio. Euro
	Verstärkung einer Windkraftturbine	Niederlande	-	10% der ursprünglichen Baukosten
	Isolierung des Wohnungsbestandes und Neubau von Häusern nach Passivhausstandard	Niederlande	-	23 Mrd. Euro

#### **4.4.4 Zusammenfassung**

##### **Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen**

Negative Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirtschaft werden vor allem durch das Auftreten von Extremwetterereignissen, wie Stürmen, Starkregen oder Sturmfluten, erwartet. Die Beschädigung von Produktivkapital sowie die Unterbrechung von Lieferketten oder der Strom- und Wasserversorgung können zu erheblichen Betriebsunterbrechungen bei Industrie und Gewerbe führen. Trotz des erheblichen wirtschaftlichen Schadenspotentials finden sich kaum Angaben zu klimawandelbedingten Schadens- beziehungsweise Anpassungskosten. Mögliche Anpassungsmaßnahmen werden vor allem für den Gebäudebereich diskutiert.

Auch für den Energiesektor, der als eine der kritischen Infrastrukturen eine Schlüsselfunktion für die Wirtschaft einnimmt, liegen nur wenige Studien vor, die eine monetäre Bewertung von Anpassungsmaßnahmen vornehmen. Durch den Klimawandel könnte es vor allem zu einer Verknappung des Kühlwassers für Kraftwerke kommen. Extremwetterereignisse könnten zudem die Energieinfrastruktur beschädigen und zu Versorgungslücken führen.

Im Fokus der Studien über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus stehen die globalen Veränderungen von Tourismusströmen. Dabei werden Temperaturänderungen betrachtet, die sich in unterschiedlicher Weise sowohl auf den Sommer- als auch den Wintertourismus auswirken können. Weiterhin wird in einem Großteil der Studien der Einfluss von Niederschlagsänderungen auf die Attraktivität einer Region für den Tourismus untersucht (unter anderem Agrawala 2007).

##### **Ökonomische Betrachtung**

Schadenschätzungen für Industrie und Gewerbe beziehen sich häufig auf vergangene Extremwetterereignisse. Die Erkenntnisse aus diesen Studien können dazu dienen, bestimmte Zusammenhänge aufzuzeigen und diese für Schadensschätzungen zu nutzen, wie beispielsweise die Relation zwischen Überflutungshöhe und Schaden an Gebäuden oder Inventar. Weiterhin lassen sich bestimmte Wirkungsmechanismen in einer Region in Abhängigkeit von der Intensität des Ereignisses identifizieren. Während beispielsweise die indirekten Schäden bei kleinen Ereignissen zunächst relativ gering sind, steigen sie mit einer Zunahme der direkten Schäden stark an (Hallegatte 2008, Hallegatte et al. 2011). Diese Beobachtung lässt sich zum einen dadurch erklären, dass höhere Schäden an Produktionsgebäuden und -anlagen

eine längere Wiederaufbauphase benötigen. Zum anderen sinkt die Kapazität für den Wiederaufbau mit der Stärke der Betroffenheit der regionalen Wirtschaft. Zudem steigt mit höheren direkten Schäden die Wahrscheinlichkeit, dass nicht direkt von der Katastrophe betroffene Betriebe, aufgrund von Lieferschwierigkeiten von Zwischenprodukten aus anderen Betrieben ebenfalls ihre Produktion einschränken müssen.

In der Energiebranche ist die Klimafolgenforschung im Vergleich zu anderen Handlungsfeldern relativ weit fortgeschritten. Die Datenlage und die vorhandene Methodik für die Schätzung der Kosten des Klimawandels scheinen relativ gefestigt zu sein. Unsicherheiten bestehen vor allem bezüglich der Entwicklung der Energiepreise und des Auftretens von Extremereignissen, wie Hitzeperioden, unter den sich langfristig ändernden klimatischen Bedingungen. Allerdings beziehen sich die Studien vor allem auf die Energiebranche selbst und weniger auf die Effekte von Energieversorgungslücken auf die Wirtschaft und das gesellschaftliche Leben. Außerdem finden sich wenige quantitative Aussagen zu den Kosten von Anpassungsmaßnahmen.

## **4.5 Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur**

### **4.5.1 Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen**

#### **4.5.1.1 Auswirkungen des Klimawandels**

Der Klimawandel betrifft sowohl die allgemeine Infrastruktur, die Stadt- und Bauleitplanung als auch insbesondere Grünflächen. Vor allem in Städten sind Hitzeeffekte bedeutend, welche durch geringe Frischluftzufuhr in Form von Hitzeinseln auftreten können. Weiterhin wirken stärkere und häufigere Niederschläge auf Infrastrukturen, aber auch Gebäude. Es besteht eine höhere Gefahr von Hochwasser und Überschwemmungen. In diesem Zusammenhang müssen auch Extremereignisse, wie Starkniederschläge oder Stürme genannt werden. Hierdurch sind sowohl Siedlungsgebiete (Grundstücke und Gebäude) als auch die Verkehrsinfrastrukturen betroffen. Folgen für die Stadt- und Raumplanung sind ebenfalls von einem ansteigenden Meeresspiegel zu erwarten, welcher Siedlungen und Infrastrukturen an den Küsten gefährdet. All diese Folgen des Klimawandels wirken sich auf zukünftige Planungsprozesse aus.

#### **4.5.1.2 Schadenskosten**

Viele Studien zu anderen Handlungsfeldern beinhalten Auswirkungen des Klimawandels auf räumliche Strukturen. Besonders der Bereich Küsten- und Hochwasserschutz ist relevant (siehe Kapitel 4.1 – Küsten- und Hochwasserschutz). Hier werden meist Schäden von vergangenen Ereignissen genutzt, um klimawandelbedingte Veränderungen zu projizieren. Weitere Studien monetarisieren die Gesundheitsfolgen von Hitze in Städten mit Hilfe von Zahlungsbereitschaften, Behandlungskosten und sinkender Arbeitsproduktivität (siehe Kapitel 4.6 – Menschliche Gesundheit). Das EU-Projekt „Climate Proofing of key EU policies“ betrachtet die vermiedenen Schadenskosten für das Anlegen von Grünflächen und Einrichten von Gründächern. Eine Abschätzung erfolgt hier anhand der erwarteten Temperaturentwicklung in den unterschiedlichen EU-Staaten, sowie des Ist-Zustands an Grünflächen und Gründächern in europäischen Städten. Für die Monetarisierung der Schäden wurde das VOLY-Konzept verwendet (Altvater et al. 2012).

Der Klimawandel bewirkt unter anderem, dass sich die Artenvielfalt auf Grünflächen verändert. Da sich Artenvielfalt nur schwierig monetarisieren lässt, liegen hierzu nur wenige Studien vor. Verwendete Monetarisierungsansätze sind die Bewertung von Ökosystemdienst-

leistungen, zum Beispiel der Erholungsfunktion, oder der Reduktion von Hitzebelastung und den Folgen für die menschliche Gesundheit (siehe Kapitel 4.3 – Naturschutz und Kapitel 4.6 – Menschliche Gesundheit).

Um die Betroffenheit räumlicher Strukturen darzustellen, liegen verschiedene Ansätze vor, zum Beispiel die Kombination von Überschwemmungskarten mit Standorten der Energieversorgung, der medizinischen Versorgung etc.

#### **4.5.1.3 Anpassungsmaßnahmen und -kosten**

Anpassungsmaßnahmen im Bereich Stadt- und Raumplanung können in direkte und indirekte Maßnahmen unterschieden werden.

Die zentrale indirekte Maßnahme in der Stadt- und Raumplanung besteht in der Integration der Folgen des Klimawandels in die Planungsprozesse der Raum- und Stadtplanung. Konkret sind dies die Veränderung von Standards und Normen oder angepasste Bebauungspläne für hochwassergefährdete Gebiete oder urbane Innenstadträume, die Hitze gefährdet sind. In die strategische Umweltprüfung könnten zum Beispiel Aspekte der Klimaanpassung eingehen. Das Ausweisen von Überschwemmungsgebieten oder Vorranggebieten für den Hochwasserschutz sollte in der Regionalplanung beachtet werden.

Direkt wirksam sind Maßnahmen, wie grüne Dächer, das Ausweisen von Grünflächen oder das Einrichten von Abfluss- und Retentionsbecken.

Die Analyse von Anpassungskosten an den Klimawandel ist noch wenig fortgeschritten. Altwater et al. (2012) analysieren die Kosten von zusätzlichen Grünflächen und Grünen Dächern für die Europäische Union, wobei Investitionskosten und jährliche Instandhaltungskosten für Gründächer angesetzt werden. Für Grünflächen werden Opportunitätskosten in der Form von entgangenen Einnahmen bezogen auf alternative Nutzungen berechnet. Hiermit ergeben sich für Grünflächen heute Anpassungskosten in Höhe von 2,6 bis 5 Mrd. Euro pro Jahr. Für Grüne Dächer betragen die Anpassungskosten zwischen 5,2 bis 7 Mrd. Euro Investitionskosten und jährliche Instandhaltungskosten von 80 bis 100 Mio. Euro für alle Städte in der EU. Diesen Kosten stehen dann verschiedene positive Effekte gegenüber, unter anderem Hitzeschutz, Erholungsfunktion, Schutz der Artenvielfalt.

Tröltzsch et al. (2012) berechnen in ihrer Studie die Kosten grüner Dächer für die Stadt Düsseldorf anhand von Anreiz- und Finanzierungsinstrumenten, d.h. öffentlichen Fördergeldern. Für die Förderung wird eine Bandbreite zwischen 10 und 20 Euro pro m<sup>2</sup> angenommen. Um

innerhalb der nächsten zehn Jahre den Gründachanteil in Düsseldorf auf 50% zu erhöhen, fallen somit zwischen 3 und 8 Mio. Euro pro Jahr an. Für eine Fallstudie in der Stadt Stuttgart werden die Kosten für das Freihalten einer Frischluftschneise im Stadtgebiet berechnet. Als Komponenten wurden Opportunitätskosten in Form von entgangener Bruttowertschöpfung und reduzierten Gewerbesteuereinnahmen einbezogen. Die entgangene Bruttowertschöpfung beträgt 32 Mio. Euro pro Jahr, die Gewerbesteuer würde um 900.000 Euro jährlich verringert.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Altvater et al. 2012	Investitionskosten und Instandhaltungskosten für Gründächer	Europa	heute	Investitionskosten: zwischen 5,2 und 7 Mrd. Euro, Instandhaltung: 80 bis 100 Mio. Euro/a
	Entgangene Einnahmen durch zusätzliche Grünflächen	Europa	heute	2,6 bis 5 Mrd. Euro/a
Tröltzsch et al. 2012	Fördergelder für das Einrichten von Gründächern	Stadt Düsseldorf	10 Jahre (Ziel: 50% Gründächeranteil)	3 bis 8 Mio. Euro/a
	Opportunitätskosten für Frischluftschneise – entgangene Bruttowertschöpfung und Gewerbesteuer	Areal im Stadtgebiet von Stuttgart	heute	Bruttowertschöpfung: 32 Mio. Euro/a, Gewerbesteuer: 900.000 Euro/a

#### 4.5.1.4 Zusammenfassung

##### Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen

Für Hamburg kann laut Klimamodell eine Erhöhung der durchschnittlichen Temperaturen und der Anzahl der Hitzetage erwartet werden, so dass Hitzeeffekte in der Stadt auftreten können. Anpassungsmaßnahmen können direkter und indirekter Natur sein. Zur direkten Anpassung kann das zusätzliche Ausweisen und Erhalten von Grünflächen dienen. Gründächern können ebenfalls den Hitzeeffekt mindern. Daneben ist eine geringere beziehungsweise stagnierende versiegelte Fläche in der Stadt anzustreben, zum Beispiel auf Parkplätzen.

Hamburg ist ebenfalls durch den Meeresspiegelanstieg und stärkere Hochwasser und Stürme betroffen, so dass zusätzliche Überschwemmungsgebiete ausgewiesen werden könnten. Die indirekten Maßnahmen zur Raum- und Regionalplanung sollten so schnell wie möglich in die Planungsprozesse integriert werden, da diese Prozesse langfristige Folgen in der Bebauungsstruktur haben, die stark pfadabhängig sind und im Nachhinein nur unter großem Aufwand korrigiert werden können (Tröltzsch et al. 2011).

### **Ökonomische Betrachtung**

Für die Bestimmung der Schadenskosten liegen für räumliche Strukturen keine expliziten Berechnungen vor. Vielmehr werden diese Schäden implizit in anderen Handlungsfeldern miterfasst: Schäden durch Hochwässer an Küsten und Flüssen können anhand von vergangenen Schadensereignissen bestimmt werden; Schäden an Grünflächen können sich auf die Artenvielfalt auswirken. Hier sind Monetarisierungsansätze über Ökosystemdienstleistungen möglich.

Im Bereich der Stadt- und Regionalplanung sind nur wenige Daten zu den Kosten der Anpassung an den Klimawandel vorhanden. Die Verwaltungskosten für das reine Ausweisen von Flächen werden vermutlich im normalen Budget der jeweiligen Funktionsträger tragbar sein. Die größeren Kostenkomponenten fallen bei der Einrichtung beziehungsweise Pflege von Gründächern und -flächen an sowie durch entgangene Einnahmen. In zwei aktuellen Veröffentlichungen wurden grüne Dächer und das Einrichten von Grünflächen im Klimawandelzusammenhang betrachtet. Die Kosten für grüne Dächern lassen sich anhand von Fördermitteln oder realen Investitions- und Instandhaltungskosten ermitteln. Für Grünflächen werden Opportunitätskosten in Form von entgangenen volkswirtschaftlichen Einnahmen verwendet.

## **4.5.2 Infrastruktur**

### **4.5.2.1 Auswirkungen des Klimawandels**

Technische Basisinfrastrukturen, zu denen die Energieversorgung (siehe Kapitel Wirtschaft, Energie und Tourismus), Informations- und Kommunikationstechnologien, Transport und Verkehr sowie (Trink-)Wasserversorgung und Abwasserentsorgung zählen, sind vor allem bei einer Zunahme von Extremereignissen vom Klimawandel betroffen. In nahezu allen gesellschaftlichen Bereichen finden sich heute elektrische beziehungsweise elektronische Geräte, Mess- und Regelungstechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnologien und es

ist anzunehmen, dass die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit elektrischen Stroms und verschiedenster Technologien weiter zunehmen wird (BMI 2009). Die Verkehrsinfrastruktur, zu der sowohl Straßen, Schienen, Luft- und andere Verkehrswege als auch dazugehörige Einrichtungen und Systeme gehören, gewährleistet die starke Vernetzung der Gesellschaft und der Wirtschaft in Deutschland. Die Wirtschaft basiert heutzutage auf stark arbeitsteiligen Produktionsprozessen, die für den Transport von Zwischenprodukten auf ein schnelles und qualitativ hochwertiges Gütertransportsystem und Transportdienstleistungen angewiesen ist. Schon vergleichsweise kleine Störungen an einem Knotenpunkt können daher schnell zu Kaskadeneffekten und hohen Folgeschäden führen. Beeinträchtigungen können durch Stürme Überschwemmungen, Starkniederschläge, Hitze- oder Kälteperioden entstehen. Nach Bräuer et al. (2009) wird für Starkregenereignisse in Deutschland eine flächendeckende Zunahme erwartet, örtlich können sie sogar um 75% zunehmen. Für Hochwasser wird das Elbehochwasser 2002 als Referenzereignis herangezogen. Es wird erwartet, dass solche Ereignisse in 2050 jedes fünfte Jahr und in 2100 jedes zweite Jahr auftreten. Ein Sturm der Stärke Kyrills aus dem Jahr 2007 wird den Einschätzungen nach um 2050 jedes zweite Jahr und um 2100 jedes Jahr auftreten.

#### **4.5.2.2 Schadenskosten**

Die stärksten wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur sind über den Wirkungskanal der Überschwemmungen zu erwarten. Nach Schätzungen von Bräuer et al. (2009) werden diese unter der Annahme einer Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse zu zusätzlichen Kosten für die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland von 0,6 Mrd. Euro im Jahr 2050 und von 1,5 Mrd. Euro im Jahr 2100 führen. Unwetter wie der Orkan Kyrill können nach Bräuer et al. (2009) zu zusätzlichen Kosten in Höhe von 10 Mio. Euro (2050) bis 20 Mio. Euro (2100) führen. Ebenso können extreme Hitzeperioden Schäden an der Infrastruktur verursachen. Der Hitzesommer 2033 führte in Großbritannien beispielsweise zu 100 hitzebedingten Schienenverformungen mit Reparaturkosten von 1,3 Mio. £. Die daraus entstandenen Reisezeitverluste wurden auf 2,2 Mio. £ geschätzt (Bräuer et al. 2009). Auf Deutschland übertragen werden die Schäden durch Schienenverformung bis 2050 auf 3,1 Mio. Euro und bis 2100 auf 9,1 Mio. Euro und die dadurch entstehenden Zeitverluste auf 5,5 Mio. Euro (2050) bis 16,4 Mio. Euro (2100) geschätzt. Wärmere Winter könnten dagegen zu einem Rückgang der Winterdienstkosten von 320 Mio. Euro bis

2050 und 1 Mrd. Euro bis 2100 führen. Die Quantifizierung der erwarteten Schäden erfolgt über eine Hochrechnung von Schäden bisheriger Extremwetterereignisse. Die Annahmen über die Veränderung der Häufigkeit von Extremereignissen werden von Bräuer et al. (2009) auf Grundlage einer Trendanalyse der Vergangenheit, verschiedener Klimastudien und Expertenmeinungen getroffen.

Hunt (2008a) untersucht für Großbritannien die Auswirkungen des Klimawandels auf die Transportinfrastruktur bis 2080. Dazu werden verschiedene klima- und sozioökonomische Szenarien zu Grunde gelegt. Die Kosten durch Absenkungen von Infrastruktureinrichtungen sowie durch Betriebsstörungen und zusätzliche Wartungsarbeiten im Winter werden auf Basis von Instandsetzungskosten geschätzt, die aus historischen Ereignissen bekannt sind. Für die zusätzlichen Kosten durch Überschwemmungen werden Verzögerungszeiten zu Grunde gelegt, die aus früheren Studien abgeleitet sind. Die klimawandelbedingten Absenkungen von Infrastruktureinrichtungen führen demnach in Großbritannien jährlich zu durchschnittlichen Kosten von 35 Mio. £ (geringer Klimawandel) bis 101 Mio. £ in 2080. Die durchschnittlichen Kosten durch Überschwemmungen belaufen sich entsprechend auf 13 bis 26 Mio. £ pro Jahr. Demgegenüber wird aufgrund der mildereren Winter, die in den Klimaszenarien prognostiziert werden, mit weniger Betriebsstörungen und notwendigen Wartungsarbeiten zu rechnen sein, so dass eine Reduktion der Kosten um 102 bis 340 Mio. £ pro Jahr erwartet wird.

In einer Zusammenstellung der Vulnerabilitäten des Verkehrssektors von Zebisch et al. (2005) wird ein Zusammenhang zwischen der Fahrzeuginnentemperatur und den Unfallzahlen im Straßenverkehr festgestellt. Temperaturen über 32°C führen demnach zu einer Erhöhung der Unfälle von 13% (außerorts) bis 22% (Stadtverkehr). Da die Fahrzeuge zunehmend klimatisiert sind, wäre zu prüfen, ob diesem Effekt damit bereits entgegengewirkt wurde. Neben der Verkehrssicherheit kann auch die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Verkehrssysteme durch extreme Wetterlagen beeinträchtigt werden. Stürme können starke Schäden an Oberleitungen verursachen. Außerdem können starke Niederschläge und Hochwasserereignisse Gleise des Schienenverkehrs unterspülen. Auch die Nutzbarkeit der Infrastruktur in der Binnenschifffahrt kann durch Frost und Eis sowie starke Variationen der Wasserstände stark beeinträchtigt werden.

Kostenschätzungen für Schäden an der Abwasserinfrastruktur sind aus der vorliegenden Literatur nicht zu entnehmen. Zusätzliche Kosten durch den Klimawandel werden hier haupt-

sächlich durch eine Überlastung der Kanalisation aufgrund vermehrt auftretender Starkregenereignisse sowie durch Ablagerungen aufgrund von langen Trockenperioden erwartet.

Studie	Monetarisierte Schadenskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Bräuer et al. (2009)	Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Stürme	Deutschland	2050, 2100	10 Mio. Euro (2050), 20 Mio. Euro (2100)
	Schäden durch Schienenverformung	Deutschland	2050, 2100	3,1 Mio. Euro (2050), 9,1 Mio. Euro (2100)
	Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Überschwemmungen	Deutschland	2050, 2100	0,6 Mrd. Euro (2050), 1,5 Mrd. Euro (2100)
	Winterdienstkosten	Deutschland	2050, 2100	-320 Mio. Euro (2050), -1 Mrd. Euro (2100)
	Zeitverluste durch extreme Hitze im Schienenverkehr	Deutschland	2050, 2100	5,5 Mio. Euro (2050), 16,4 Mio. Euro (2100)
	Zeitverluste durch Hochwasser im Schienenverkehr	Deutschland	2050, 2100	2,5 Mio. Euro (2050), 6,7 Mio. Euro (2100)
Hunt (2008a)	Jährliche durchschnittliche Kosten durch Absenkung der Infrastruktur	Großbritannien	2020, 2050, 2100	2 Mio. £ (2020), 52 Mio. £ (2050), 101 Mio. £ (2080)
	Jährliche durchschnittliche Kosten durch Überschwemmungen	Großbritannien	2020, 2050, 2100	12 Mio. £ (2020), 19 Mio. £ (2050), 26 Mio. £ (2080)
	Jährliche durchschnittliche Kosten durch Betriebsstörungen und Instandhaltungsarbeiten im Winter	Großbritannien	2020, 2050, 2100	-45 Mio. £ (2020), -148 Mio. £ (2050), -340 Mio. £ (2080)

#### 4.5.2.3 Anpassungsmaßnahmen und –kosten

Für Maßnahmen zur Anpassung der Verkehrsinfrastruktur liegen in der untersuchten Literatur nur sehr begrenzt Kostenschätzungen vor. Ein Ansatz für eine entsprechende Analyse findet sich in van Ierland et al. (2007). Allerdings ist die Datenverfügbarkeit hier nicht ausreichend um eine Quantifizierung der Anpassungskosten vorzunehmen. Die diskutierten Maßnahmen reichen von einem angepassten Verhalten, d.h. den Wechsel der Transportart bis hin zu der Entwicklung von intelligenten Infrastrukturen, die auch als Frühwarnsysteme dienen können. Für die Entwicklung und Implementierung neuer Arten der Infrastruktur sind hohe Investiti-

onskosten und ein langer Planungszeitraum wahrscheinlich. Außerdem können umfangreiche Anpassungen von Stadt- und Raumplanung erforderlich sein. Der Nutzen würde sich in sicherem und zuverlässigem (öffentlichen) Verkehr bemerkbar machen. Zusätzlich zur Klimaanpassungsleistung könnten so auch Staus vermieden werden. Der Wert solcher Maßnahmen könnte mittels der vermiedenen Kosten von Verzögerung oder Verspätungen approximiert werden.

Tröltzsch et al. (2012) liefern erste Schätzungen zu Anpassungen der Verkehrsinfrastruktur. Ihnen zu Folge werden zwischen 2040 und 2070 rund 6.600 km des deutschen Autobahnnetzes vom Klimawandel betroffen sein. Die Mehrkosten für eine verbesserte Asphaltmischung, die extremer Hitze standhält, werden auf 10 bis 40 Mio. Euro pro Jahr geschätzt.

Im Bereich der Abwasserinfrastruktur werden unter anderem dezentrale (Versickerung, Speicherung und Nutzung) und zentrale Maßnahmen, wie vergrößerte Abflussquerschnitte oder zentrale Bauwerke zur Regenwasserbehandlung, diskutiert (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2011). Starken Schwankungen der Niederschlagsmengen kann beispielsweise durch eine flexiblere Gestaltung der Abwasserinfrastruktur in Form von Kleinkläranlagen begegnet werden. Diese bieten die Vorteile, dass sie schnell verlegt werden können und keine verbindenden Kanäle benötigen. Um bei längeren Trockenperioden im Sommer vermehrte Ablagerungen in den Kanälen zu verhindern, werden wahrscheinlich angepasste Betriebsstrategien in Hinblick auf die Wartung, Inspektion und Reinigung erforderlich sein.

Kostenschätzungen für entsprechende Maßnahmen liegen nur sehr begrenzt vor. Van Ierland et al. (2007) schätzen die Gesamtkosten für eine Sanierung des Entwässerungssystems in den Niederlanden auf zwischen 3 und 5 Mrd. Euro. Um der Überflutungsgefahr bei Starkregenereignissen zu begegnen schlagen van Ierland et al. (2007) zudem eine Ausweitung der Retentionsflächen und Wasserspeichermöglichkeiten vor. Die Kosten für eine Anpassung des städtischen Wassersystems in diesem Sinne werden auf 3,3 Mrd. Euro geschätzt.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
van Ierland et al. (2007)	Sanierung des Entwässerungssystems	Niederlande	-	3 bis 5 Mrd. Euro
	Anpassung des städtischen Wassersystems (Retentionsflächen, Wasserspeichermöglichkeiten)	Niederlande	-	3,3 Mrd. Euro
Tröltzsch et al. (2012)	Mehrkosten für die Sanierung des Autobahnnetzes	Deutschland	2040-2070	10 bis 40 Mio. Euro/a für 6.600 km

#### 4.5.2.4 Zusammenfassung

##### Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen

Die Funktionsfähigkeit von Infrastrukturen kann bei einer Zunahme von Extremereignissen in nahezu allen Bereichen (Energieversorgung, Informations- und Kommunikationstechnologien, Transport und Verkehr sowie (Trink-)Wasserversorgung und Abwasserentsorgung) gefährdet sein. Kosten- und Nutzenabschätzungen zu Anpassungsmaßnahmen in diesen Bereichen liegen im Gegensatz zu anderen Handlungsfeldern bislang kaum vor. Allerdings werden bereits zahlreiche Anpassungsoptionen in der Literatur diskutiert. Eine umfassende Zusammenstellung für den Bereich Verkehr und Transport findet sich in Tröltzsch et al. (2011) und Tröltzsch et al. (2012). Hier werden unter anderem technische Anpassungen diskutiert, wie hitzeresistente Straßenbeläge oder Schieneninfrastruktur zur Vermeidung von Verformungen oder der Einsatz neuer Materialien könnte im Bereich des Schiffbaus dazu genutzt werden leichtere Schiffe zu konstruieren. Auch können Anpassungen in der Logistik und im Gütertransport für eine geringere Vulnerabilität gegenüber dem Ausfall von Verkehrsinfrastrukturen sorgen, indem beispielsweise die gebündelte Produktion an einem Ort die just-in-time Produktion ersetzt und Verkehr vermieden wird.

Die Wasser- und Abwassersysteme müssen ebenfalls vor allem auf eine stärkere Variabilität von Niederschlagsmengen ausgerichtet werden. Unter anderem aufgrund der starken Unsicherheit in Bezug auf die Entwicklung von Extremereignissen im Zuge des Klimawandels werden hier vor allem flexible Lösungen angestrebt.

## **Ökonomische Betrachtung**

In der Literatur lassen sich umfassende Informationen über die Vulnerabilität von Verkehrs-, Energie-, Wasser- und Abwassersysteme sowie über mögliche Anpassungsoptionen finden. Kosten- und Nutzen-Abschätzungen für Anpassungsmaßnahmen der Infrastruktur liegen in den vorliegenden Literaturquellen allerdings nur in Ausnahmefällen (siehe Tröltzsch et al. 2012) vor. Durch die Schlüsselfunktion, die viele Bereiche der Infrastruktur einnehmen, bergen Störungen ihrer Funktionsfähigkeit allerdings ein hohes Schadenspotential. Daher ist eine Anpassung an den Klimawandel hier besonders angezeigt. Insbesondere für die Informations- und Kommunikationstechnologien, denen steigende wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung zukommen, gibt es keine Studien zu Schäden durch und mögliche Anpassung an den Klimawandel.

## **4.6 Menschliche Gesundheit**

### **4.6.1 Auswirkungen des Klimawandels**

Die menschliche Gesundheit kann über verschiedene Klimaauswirkungen beeinflusst werden. Vor allem der sehr heiße Sommer 2003 führte zu einer Diskussion der Folgen von erwarteten erhöhten jährlichen Durchschnittstemperaturen und Extremereignissen in Form von Hitzewellen. Starke Hitze führt zu erhöhten Kreislaufbelastungen und birgt die Gefahr der Dehydrierung.

Weitere Gesundheitsrisiken entstehen durch lange Trockenheitsperioden, Stürme und Hochwässer. Infolge dieser Effekte werden weitere klimawandelbedingte Auswirkungen erwartet, unter anderem die Verbreitung von Krankheitserregern. Hier wird eine stärkere, deutschlandweite Verbreitung von Zecken prognostiziert. Aber auch Infektionen, wie Salmonellen und Noroviren, können durch die erhöhten Temperaturen vermehrt auftreten. Durch die Verlängerung der Vegetationsphase von Pflanzen aber auch durch Trockenheit wird ferner mit einem erhöhten Auftreten von Allergien beziehungsweise einer verlängerten Beschwerdezeit gerechnet (vgl. Mücke et al. 2009, Lindgren 2006, Department of Health 2008, Tröltzsch et al. 2011).

### **4.6.2 Schadenskosten**

Die vorliegenden Studien zu Schadenskosten beschäftigen sich mit den Folgen von Temperaturerhöhungen sowie Hitzewellen. Gerade nach dem Sommer 2003 wurden Untersuchungen durchgeführt, die auf Grundlage vergangener Schadensereignisse die Schäden monetarisieren, d.h. die Schäden von bisher aufgetretenen zusätzlichen Todesfällen beziehungsweise Behandlungskosten bei Dehydrierung. Viele Studien nehmen an, dass der Sommer des Jahres 2003 einem normalen Sommer Ende des 21. Jahrhunderts entspricht (vgl. unter anderem Hübler und Klepper 2007, Hunt 2008a). Auf dieser Basis leiten die Autoren Schäden durch erhöhte Temperaturen und eine höhere Anzahl von Hitzetagen im Sommer ab.

Die Prognose über häufiger auftretende vektor- und wasserübertragene Krankheiten erfolgt anhand von Modellierungen, zum Beispiel über Dynamic Integrated Assessment Models (vgl. Bosello et al. 2005, Ebi 2007). Dabei werden vor allem die erhöhten Temperaturen als Klimawandelauswirkungen in die Modelle eingespeist.

In den Studien wird zur Evaluierung der Schadenskosten meist das „value of a statistical life“ oder das „value of a life-year“-Konzept verwendet. Die Konzepte arbeiten mit Zahlungsbereitschaften, die auf verschiedenen regionalen Ebenen vorliegen. Nach dem Opportunitätskosten-Ansatz werden weiterhin medizinische Behandlungskosten als Schadenskosten angesetzt. Die Krankenhauskosten werden auf eine erhöhte Zahl von Betroffenen während Hitzewellen hochgerechnet. Hübler und Klepper (2007) betrachten die Auswirkungen von Hitzewellen in Deutschland und beziehen hier ebenfalls die erwartete demographische Entwicklung ein. Die besondere Risikogruppe der älteren Menschen nimmt im Laufe des Jahrhunderts zu, so dass die Auswirkungen von höheren Temperaturen dadurch nochmals ansteigen. Die Autoren rechnen für das Jahr 2100 mit 3.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch erhöhte Temperaturen im Sommer.

Hübler und Klepper (2007) berechnen zudem die volkswirtschaftlichen Schäden als Opportunitätskosten des temperaturbedingten Rückgangs der Arbeitsproduktivität. Dabei kann ab einer Temperatur von 25°C ein Rückgang der Arbeitsproduktivität, zuerst bei Arbeiten außerhalb von Gebäuden, angenommen werden. Die genauen Angaben zur verminderten Produktivität bei hohen Temperaturen variiert je nach Studie sehr stark. Hübler und Klepper (2007) gehen von einer sehr moderaten Annahme des Rückgangs der Arbeitsproduktivität zwischen 3 und 12% bei 26 bis 36°C im Vergleich zu Temperaturen um 20°C aus.

Mit Hilfe des REMO-Klimamodells werden die wahrgenommenen Tagestemperaturen modelliert und mit der Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit verrechnet. Ebenfalls werden Ausfallzeiten durch Krankheitstage eingerechnet. Aus den Rechnungen von Hübler und Klepper (2007) ergibt sich ein BIP-Rückgang durch höhere Sommertemperaturen zwischen 0,1 und 0,4% des BIP pro Jahr in dem Zeitabschnitt 2071-2100, im Vergleich zu 2005. Bosello et al. (2005) verweisen darüber hinaus auf erhöhte Gesundheitskosten durch eine Verdrängung von privaten Ausgaben, d.h. für den Erwerb von anderen Gütern und Dienstleistungen stehen weniger finanzielle Mittel zur Verfügung.

Weitere Studien für Europa arbeiten mit der gleichen Methodik wie Hübler und Klepper (2007). Alberini und Chiabai (2005) untersuchen die Folgen der Hitzewelle 2003 in Rom und rechnen diese auf 2020 hoch. Sie berechnen einen Schaden (ohne Anpassungsmaßnahmen) von 281 Mio. Euro pro Jahr für die Stadt Rom. Hunt (2008a) erarbeitet eine Monetarisierungsmethodik für gesundheitliche Folgen von Hitzewellen und wendet diese im englischen County Hampshire an. Das Resultat sind projizierte Schadenskosten zwischen 10 und 20 Mio. £ pro Jahr (für 2080).

Kovats et al. (2011) beschäftigten sich im ClimateCost-Projekt mit Schadenskosten des Klimawandels im Gesundheitsbereich in Europa. Sie berechnen eine erhöhte hitzebedingte Mortalität, Auswirkungen von Salmonellen-Fällen und Tote durch Küstenhochwässer. Für Hitzeauswirkungen und Folgen von Hochwasser bezogen sie verlorene Arbeitszeiten auf der Basis des BIP und Tote basierend auf Konzepten wie Value-of-life-year (VOLY) und value of prevented fatality (VPF) ein. Für 2020 errechneten sie anhand des VOLY-Konzepts Schäden in Westeuropa (inkl. Deutschland) zwischen 135 und 247 Mio. Euro pro Jahr. Die Spannweite ergibt sich aus der möglichen Akklimatisierung und damit der physischen Anpassung der Menschen an höhere Durchschnittstemperaturen. Für VPF ergeben sich 5 bis 10 Mio. Euro/Jahr im Jahr 2020. Sie nehmen weitere Berechnungen für 2050 und 2080 vor. Für Hochwasser an der Küste ergeben sich Wohlfahrtskosten der erhöhten Mortalität zwischen 7 und 51 Mio. Euro pro Jahr für Westeuropa (in 2020). Bis 2080 kann dies im Maximalfall bis auf 460 Mio. Euro pro Jahr steigen.

Die Kosten für die erhöhte Anzahl von Salmonellen setzen sich zusammen aus den Behandlungskosten, geringerer Arbeitsproduktivität sowie Ausfallzeiten, und weitere Kosten, wie monetarisierte Einschränkungen der Lebensqualität (Schmerzen, verlorene Freizeit etc.). Die Kosten pro Salmonellen-Fall liegen demnach zwischen 3.500 und 7.000 Euro. Hochgerechnet für die westeuropäischen Staaten ergeben sich 8,7 bis 27,7 Mio. Euro pro Jahr in 2080 (Kovats et al. 2011).

Watkiss et al. (2009) nutzen im PESETA-Projekt für die Monetarisierung die gleichen Komponenten und Methoden wie ClimateCost. Allerdings verwenden sie zur Berechnung der Mortalität länderspezifische Funktionen basierend auf dem cCASH-Projekt und für die Klimaeinflüsse eine Berechnungsmethode, welche sowohl hitze- (im Sommer) als auch kälterelevante (im Winter) Mortalität einbezieht. Für Europa werden für wärmere Winter eine geringere Mortalität und geringere Schadenskosten in Höhe von 9 bis 240 Mrd. Euro pro Jahr in 2080 geschätzt. Die Autoren errechnen Schadenskosten durch höhere Temperaturen im Sommer zwischen 8 und 180 Mrd. Euro pro Jahr (in 2080).

Studie	Monetarisierte Schadenskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Hübler & Klepper (2007)	Auf Basis von vergangenem Schadensereignis (Sommer 2003) Temperaturbedingte erhöhte Mortalität anhand VSL, VOLY-Konzepten	Deutschland	2100	6-8 Mrd. US-\$, 10-12% der Wasserkosten ohne Klimawandel

	Rückgang der Arbeitsproduktivität	Deutschland	2100	0,1 bis 0,4% des BIP
Alberini & Chibai (2005)	Hitzetote auf Basis des Sommers 2003, erhöhte Mortalität für den Sommer 2020	Rom	2020	281 Mio. Euro/a
Hunt (2008a)	- Auf Basis von vergangener Schadensereignis (Sommer 2003) - Zusätzliche Hitzetote über VSL- und VOLY-Konzept, zusätzliche Behandlungskosten	County Hampshire	2080 (weitere Berechnungen für 2020, 2050)	10-20 Mio. £/a
Kovats et al. (2011)	Hitzebedingte Mortalität beziehungsweise Ausfallzeiten im Sommer	Westeuropa	2020 (weitere Berechnungen für 2050, 2080)	135-247 Mio. Euro/a (VOLY), 5 bis 10 Mio. Euro/a (VPF)
	Erhöhte Mortalität und Ausfallzeiten durch Küstenhochwässer	Westeuropa	2020 (weitere Berechnungen für 2050, 2080)	7-51 Mio. Euro/a
	Schadenskosten: Behandlungskosten, geringere Arbeitsproduktivität + Ausfallzeiten durch Salmonellen-Fälle	Westeuropa	2080	8,7-27,7 Mio. Euro/a
Watkiss et al. (2009)	Verringerte Mortalität bei höheren Wintertemperaturen	Europa	2080	-9 bis -240 Mrd. Euro/a
	Mortalität und Ausfallzeiten bei höheren Sommertemperaturen	Europa	2080	8-180 Mrd. Euro/a

#### **4.6.3 Anpassungsmaßnahmen und -kosten**

Im Gesundheitssektor werden verschiedene präventive Maßnahmen, wie Informations- und Warnsysteme empfohlen. Im Zentrum stehen Maßnahmen gegen Hitzewellen, wie Hitzewarnsysteme und Informationen über das Verhalten bei Hitzewellen. Dies ist besonders für urbane Räume relevant, wo zusätzlich Hitzeinseleffekte auftreten, die in stark bebauten Gebieten mit wenig Luftaustausch nochmals einen Anstieg der Temperaturen verursachen. Genannt werden ferner Frühwarnsysteme gegen vektorübertragene Krankheiten oder Meldesysteme für Infektionskrankheiten. Des Weiteren können Informationen und Programme beziehungsweise Aktionspläne zur Bekämpfung von allergieauslösenden Pflanzen, unter anderem mit dem Einrichten von Meldestellen, eine Rolle spielen (vgl. auch Mücke et al. 2009, Zebisch et al. 2005, Jendritzky und Koppe 2008, Kaminski 2011).

Eine weitere Gruppe von Maßnahmen befasst sich mit der Kühlung von Gebäuden wie Krankenhäusern, Pflegeeinrichtungen, Schulen und Kindertagesstätten, in denen sich besonders hitzegefährdete Personen aufhalten. Zum Einsatz kommen können aktive Systeme, wie Kli-

maanlagen, zum Beispiel für Krankenhäuser, oder passive Systeme, wie Kühldecken, automatische Belüftungssysteme und Verschattungselemente bei Wohngebäuden. Einen Gesundheitseffekt haben auch stadtplanerische Maßnahmen, wie das Einrichten und Erhalten von Frischluftkorridoren sowie Grünflächen und das Vermeiden von versiegelten Flächen (vgl. Zebisch et al. 2005, Mücke et al. 2009, Hunt 2008b).

Die Anpassungsmaßnahmen im Gesundheitsbereich überlappen sich mit diversen anderen Handlungsfeldern. Ansätze zur Berechnung von Anpassungskosten sind in diesen Abschnitten enthalten, zum Beispiel raumplanerische Maßnahmen im Abschnitt zu Stadt- und Regionalplanung.

Die Kosten eines Hitzewarnsystems wurden für das Philadelphia Hot Weather Heat Watch/Warning System (PHWW) berechnet. Ebi et al. (2004) schätzen die Kosten für Maßnahmen am Tag der Hitzewarnung, wie etwa für eine Telefonhotline und die laufende aktuelle Information der Öffentlichkeit, auf 3.000 US-\$ pro Hitzetag. Daneben gehen Ebi et al. (2004) von 4.000 US-\$ pro Tag für die Verstärkung der Notdienste an Hitzetagen aus. Die Kosten weiterer beteiligter Akteure, unter anderem Wetterdienste, Landesbehörden, Pflegeeinrichtungen und Krankenhäuser, Medien etc. sind in diesen Daten nicht enthalten. Tröltzsch et al. (2012) schätzen die Kosten für die Anpassung von öffentlichen Krankenhäusern in Deutschland zwischen 100 und 475 Mio. Euro pro Jahr. Die Studie betrachtet die Investitionskosten beziehungsweise Mehrkosten für die baulichen Veränderungen an Krankenhäusern und vor allem auch die Betriebs- beziehungsweise Energiekosten durch Klimaanlage. Die Investitionskosten werden über die Lebensdauer der Umbauten auf jährliche Kosten heruntergebrochen.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Ebi et al. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reale Kosten für Hotline, Information der Öffentlichkeit etc.</li> <li>- Reale Kosten für Verstärkung der Notdienste etc.</li> </ul>	Philadelphia, USA	heute	Bis zu 7.000 US-\$ pro Hitzetag
Tröltzsch et al. (2012)	Investitionskosten für passive und aktive Kühlung in Krankenhäusern	Deutschland		100 bis 475 Mio. Euro/a

#### **4.6.4 Zusammenfassung**

##### **Betroffenheit und Anpassungsmaßnahmen**

Die Klimaanalyse Hamburg zeigt, dass die jährlichen Durchschnittstemperaturen in Hamburg um mehrere Grad ansteigen werden. An Hitzeinseln können somit auch in Hamburg sehr hohe Tages- und Nachttemperaturen erreicht werden. Eine mögliche Anpassungsmaßnahme ist daher der weitere Ausbau des Hitzewarnsystems verbunden mit Informationen an Pflegeheime, Krankenhäuser, wie zum Beispiel in Hessen umgesetzt. Die begrenzte Versiegelung von Flächen, beziehungsweise der Erhalt und das Anlegen von Grünflächen kann diese Effekte reduzieren. Weitere gesundheitliche Auswirkungen gehen von Extremwetterereignissen aus, vor allem Hochwasser und Stürmen. Der Schutz gegenüber diesen Maßnahmen besteht in der Anpassung von Gebäuden, beim Küstenschutz, sowie beim Katastrophenschutz. Ein weiterer Schwerpunkt der Anpassung liegt auf vektor- und wasserübertragenen Krankheiten. Hier bieten sich Melderegister und Frühwarnsysteme an. Ebenfalls werden erhöhte allergische Reaktionen erwartet, die das Entfernen der Pflanzen, weitere Informationsmaßnahmen und Meldeprozesse notwendig machen können. Die Maßnahmen zur Frühwarnung und Information können verhältnismäßig kurzfristig umgesetzt werden, zeigen aber bereits bei heute eintretenden Hitzeereignissen eine Wirkung (Ebi et al. 2004, Hunt 2008a). Die Kühlung von Gebäuden kann bei Neubau beziehungsweise möglicher Sanierung oder Instandhaltung integriert werden. Langfristige Veränderungen bestehen vor allem in stadtplanerischen Veränderungen. Hunt (2008a) diskutiert diese Maßnahmen auch als No-Regret-Maßnahme, da sie die Lebensqualität steigern.

##### **Ökonomische Betrachtung**

Seit der Hitzewelle im Sommer 2003 entstand eine relativ große Anzahl von Studien zu den Folgen der durch den Klimawandel erwarteten höheren Sommertemperaturen. Die meisten Studien beziehen sich auf vergangene Schadensereignisse, meist die Hitzetage im Sommer 2003. Teilweise wird angenommen, dass die Sommertemperaturen und die Anzahl der Hitzetage 2100 dem Ereignis im Sommer 2003 entspricht. Einige Studien führen auf der Basis von Vergangenheitsdaten Modellierungen für 2020, 2050 und 2080 durch. Die Monetarisierung von Hitzetoten und -geschädigten findet über die Ermittlung von Zahlungsbereitschaften statt, meist basierend auf Befragungen. Die verwendeten Konzepte variieren zwischen Value of lost life year, Value of statistical life oder Value of prevented fatality. Weitere verwendete Komponenten der Schadenskosten sind reale Behandlungskosten in Krankenhäusern. Volks-

wirtschaftliche Schäden werden auf Basis von Opportunitätskosten für reduzierte Arbeitsproduktivität und für Ausfallzeiten bei Krankheit berechnet.

Für Anpassungskosten im Gesundheitsbereich konnten kaum Quellen gefunden werden. Angesetzt werden hier meist reale Investitionskosten und laufende Kosten, zum Beispiel für Frühwarnsysteme oder die Kühlung von Gebäuden.

## 4.7 Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst

### 4.7.1 Katastrophenschutz als Querschnittsaufgabe

Der Katastrophenschutz in Deutschland fällt in den Kompetenzbereich der Länder, welche vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) auf Bundesebene unterstützt werden. Zu den Mitgliedern gehören unter anderem Feuerwehren, das Technische Hilfswerk sowie weitere Hilfsorganisationen. Die Handlungsfelder des Katastrophenschutzes umfassen Naturkatastrophen, Massenerkrankungen (zum Beispiel Epidemien), Unfälle, kritische Infrastrukturen (zum Beispiel Energieversorgung), Terrorismus und Tierseuchen. Diese Vielschichtigkeit macht den Katastrophenschutz zu einem Querschnittsthema, d.h. Schäden und Kosten treten im Katastrophenfall in diversen Sektoren auf. Ein Orkan könnte beispielsweise Gebäude zerstören und Personenschäden verursachen, zum anderen könnten kritische Infrastrukturen unterbrochen beziehungsweise gestört werden. Analog trifft Hochwasser nicht nur den Küsten- und Hochwasserschutz, sondern könnte auch zur Verbreitung von Krankheiten (zum Beispiel Seuchen) beitragen und die Gesundheit der Menschen gefährden. Tabelle 3 führt die schwerwiegendsten Naturkatastrophen Deutschlands in den letzten 15 Jahren tabellarisch auf.

**Tabelle 3: Zusammenstellung der wesentlichen Naturkatastrophen der letzten 15 Jahre in Deutschland**

Jahr	Ereignis	Dauer	geschätzter volkswirtschaftlicher (Gesamt-)Schaden
2008	Orkan Emma	29. Februar - 2. März	Schadenshöhe: etwa 1 Milliarde Euro
2007	Orkan Kyrill	18./19. Januar	Schadenshöhe: ca. 10 Milliarden US-\$
2006	Elbehochwasser	März und April	k.A.
2005	Alpenhochwasser	Ende August - Anfang Sept.	Schadenshöhe: ca. 4 Milliarden Euro
2003	Hitzewelle (Jahrhundertssommer)	Juni, Juli, August mit Schwerpunkt in der ersten Augushälfte	Schadenshöhe: ca. 13 Milliarden US-\$
2002	Elbehochwasser (Jahrhunderthochwasser)	Mitte August	Schadenshöhe: ca. 18 Milliarden Euro (davon etwa 13 Milliarden allein in Deutschland)
2002	Orkan Jeanett	27./28. Oktober	Schadenshöhe: ca. 1,7 Milliarden Euro, davon 660 Millionen in Deutschland
1999	Orkan Lothar	26. Dezember	(Versicherungs-)Schaden: Mehr als 6 Milliarden US-\$

Quelle: Bundesministerium des Innern 2012; eigene Darstellung.

Das Elbehochwasser in 2002 und der Jahrhundertssommer 2003 (ca. 3.500 Todesfolgen in Deutschland) verursachten dabei die höchsten volkswirtschaftlichen Schäden. Aber auch extreme Stürme wie Orkan Lothar oder Orkan Kyrill sorgen immer öfter für erhebliche Sach-

und Personenschäden. Ähnliche Ereignisse in der Zukunft werden weiterhin eine große Herausforderung für den Katastrophenschutz darstellen. Dabei sollte der Fokus allerdings nicht nur auf dem akuten Umgang mit Katastrophen liegen, sondern auch die Prävention und potenzielle Vermeidung von entsprechenden Ereignissen berücksichtigen. Die Maßnahmen von Anpassungsstrategien zielen auf diese Problemstellung ab. Die Betrachtung der Nationalen Anpassungsstrategien diverser Länder zeigt, dass der Katastrophen- und Bevölkerungsschutz bislang keine explizite Berücksichtigung erfährt. Stattdessen werden die einzelnen Sektoren des Bevölkerungsschutzes (zum Beispiel Küstenschutz, Infrastruktur und Gesundheit) in den Anpassungsstrategien getrennt voneinander behandelt (BBK 2009a, BBK 2009b). Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel der Bundesregierung (2008) vereint diese einzelnen Themen hingegen im Querschnittsthema Bevölkerungsschutz und misst diesem Bereich somit eine entsprechende Priorität bei. Zu den formulierten Zielen zählt die Absicherung kritischer Infrastrukturen, wie zum Beispiel Wasser- und Stromversorgung sowie Telekommunikationsnetze. Hierbei bedarf es der engeren Zusammenarbeit zwischen staatlichen Stellen und privaten Netzanbietern, der baulichen Verbesserung bestehender Netze und der Ausweitung von Vorkehrungsmaßnahmen (zum Beispiel Evakuierungspläne und Vorwarnsysteme). Darüber hinaus fordert die Anpassungsstrategie eine effizientere Kommunikation innerhalb der Behörden, aber auch frühzeitige und vollständige Warnungen der Bevölkerung im Bedrohungsfall.

#### **4.7.2 Maßnahmen und Kosten**

Der Katastrophenschutz Hamburg (2012) zeigt sich hinsichtlich möglicher Sturmfluten sehr gut gerüstet. Einmal im Jahr wird der Ernstfall einer Sturmflut mit Helfern (unter anderem von der Feuerwehr und vom Technischen Hilfswerk) simuliert und der Schutz der Deiche geübt. Darüber hinaus informiert der Katastrophenschutz die Bewohner hochwassergefährdeter Gebiete regelmäßig mit Informationsblättern, welche auch in den Gelben Seiten publiziert werden. Seit dem vergangenen Jahr verfügt der Hamburger Katastrophenschutz zudem über ein neues Katastrophenwarnsystem. Das vom Fraunhofer Institut entwickelte KATWARN ist in der Lage die Bürger von bedrohten Gebieten – nach vorheriger Anmeldung am System – frühzeitig per SMS zu warnen beziehungsweise über die Aufhebung der Warnung zu informieren.

Zuverlässige Frühwarnsysteme können maßgeblich zur Milderung der Folgen beispielsweise starker Stürme oder Überflutungen beitragen. Eine längere Vorlaufzeit ermöglicht den Be-

hörden rechtzeitig Hilfe in die betroffenen Gebiete zu schicken, Krankenhäuser können sich entsprechend vorbereiten und Bürger sind in der Lage ihr Eigentum zu schützen. Auf der anderen Seite besteht bei langen Vorlaufzeiten die Gefahr, dass Fehlalarme ausgelöst werden, welche in volkswirtschaftlichen Verlusten resultieren oder zur Desensibilisierung führen können. Ein Zielkonflikt könnte in der Folge entstehen: Entweder wird sehr frühzeitig gewarnt und die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses ist nicht sehr hoch oder die Warnung erfolgt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit des Ereignisses kurz vor dem Eintreten (Rogers und Tsirkunow 2010). Hinsichtlich des Schutzes vor Sturzfluten haben Schröter et al. (2008) eine Kosten-Nutzen-Analyse für Frühwarnsysteme erarbeitet. Tabelle 4 zeigt die Kosten-Nutzen-Quotienten des Frühwarnsystems als auch weiterer Schutzmaßnahmen, wobei diese Werte Schröter et al. (2008) und Rogers und Tsirkunow (2010) entnommen sind.

**Tabelle 4: Vergleich von Überschwemmungsmaßnahmen**

Maßnahme	Kosten-Nutzen-Quotient		
	min	mittel	max
Polder (Elbe)	2,2	4,0	5,8
Polder (Odra)		0,1	
HRB		0,5	
lokale Schutzmaßnahmen		5,2	
Frühwarnsystem	2,6	4,6	9,0

Quelle: Schröter et. al 2008; Rogers & Tsirkunov 2011; eigene Darstellung.

Die Kennzahlen zeigen, dass das Frühwarnsystem im Mittel eine effiziente Schutzmaßnahme darstellt. Während für ein Hochwasserrückhaltebecken (HRB) und im Falle einer Polderverwendung am Odra die Kosten den Nutzen übersteigen und somit unökonomisch sind, beweisen ein Polder an der Elbe mit einem Quotienten von 4,0 und lokale Schutzmaßnahmen mit einem Quotienten von 5,2 ebenfalls eine hohe Effizienz. Eine Kombination aus lokalen Schutzmaßnahmen und Frühwarnsystem scheint die erfolgversprechendste Maßnahme zu sein (Schröter et al. 2008). Teisberg & Weiher (2009) stellen konkrete Kosten-Nutzen-Analysen von Frühwarnsystemen zusammen. Darunter findet sich auch der Beitrag von Ebi et. al (2004), der sich mit einer Hitzewelle in Philadelphia, USA von 1995 bis 1998 beschäftigt (siehe Abschnitt Gesundheit). Als Konsequenz wurde in Philadelphia ein Hitzewarnsystem installiert, welches unter anderem folgende Maßnahmen bündelte: Warnungen vor Hitze über die Fernseh- und Radioübertragung, Nachbarschaftshilfe für hilfsbedürftige Menschen oder Einsatzerhöhungen von medizinischem Personal. Die Kosten (hauptsächlich Personal-

kosten) wurden für die untersuchte Periode auf 210.000 US-\$ geschätzt. Weiterhin schätzten die Autoren, dass die genannten Maßnahmen die Rettung von 117 Leben gesichert haben. Der geschätzte Wert der geretteten Leben wird auf 500 Mio. US-\$ beziffert, ein deutlicher Nutzenüberschuss im Hinblick auf die relativ geringen Kosten des Systems. Aber auch die anderen Beispiele in Teisberg und Weiher (2009) verdeutlichen, dass die Kosten-Nutzen-Analysen deutlich für den Einsatz von Frühwarnsystem sprechen.

Studie	Anpassungskosten	Region	Zeitlicher Bezug	Ergebnisse
Schröter et. al (2008)	Frühwarnsystem zum Schutz vor Sturzfluten	Österreich, Spanien	-	2,9 Mio. Euro (Gegenwartswert) für 1.000 km <sup>2</sup> großes Flusseinzugsgebiet
Ebi et. al (2004)	Einrichtung eines Frühwarnsystems für Hitzewellen	Philadelphia (USA)	1995-1998	210.000 US-\$
Simmons & Sutter (2005)	Installation eines Radarsystems zur Früherkennung von Tornados	USA	1986-1999	1,5 Mrd. US-\$, aus GAO (1999)

#### 4.7.3 Zusammenfassung

Der Katastrophenschutz bündelt als Querschnittssektor diverse Themen wie Hochwasserschutz, Gesundheit und kritische Infrastrukturen. Der Schutz vor Sturmfluten und Hochwasser zählt aufgrund der geografischen Lage und geschichtlichen Entwicklung der Stadt zu den Kernkompetenzen des Hamburger Katastrophenschutzes. Die Literatur zum Thema Bevölkerungsschutz zeigt, dass umfangreiche und verlässliche Frühwarnsysteme die Schäden im Katastrophenfall zweifelsfrei abmildern können. Durch verbesserte Prognosen von Unwetterereignissen erhöhen sich die Zeiten zur Evakuierung und Sicherung bestehender Infrastrukturen bevor das Ereignis eintreten kann. Während die Sturmflutgefahr in Hamburg beherrschbar erscheint, entstehen vermehrt Zweifel, ob der (bundesweite) Katastrophenschutz im Falle eines größeren und zugleich unerwarteten, d.h. (derzeit) höchst unwahrscheinlichen, Ereignisses ausreichend vorbereitet wäre. Das Bundesamt für Strahlenschutz simulierte zum Beispiel zwei Kraftwerkunfälle und kam zu dem Schluss, dass der Bevölkerungsschutz nicht genügend Kapazitäten besitzt (Sueddeutsche.de 2012). Ähnliches könnte beim Ausbruch von Epidemien gelten, die im Hinblick auf bestimmte Erreger infolge des Klimawandels auch in Deutschland häufiger auftreten könnten.

## 5 Fazit

Die Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel ist ein komplexes Themengebiet, in dem es eine Vielzahl von Interdependenzen sowohl von Handlungsfeldern als auch von Anpassungsmaßnahmen gibt. Diese Zusammenhänge sind bisher nicht hinreichend untersucht, um diesbezüglich gesicherte Aussagen zu treffen. Allerdings hat die Forschung in den letzten Jahren eine Reihe von relevanten Methoden und Ergebnissen generiert, die für die Entwicklung einer Anpassungsstrategie und die Beurteilung von Maßnahmen hilfreich sind.

Bisher liegt eine Vielzahl von Studien vor, die sich durch ein hohes Aggregationsniveau auszeichnen. Dies gilt entweder sektoral oder regional, d.h. die Resultate beziehen sich oftmals auf einzelne Sektoren und/oder auf Staaten oder Staatengruppen. Dies bedingt zum Teil restriktive Annahmen in der Modellbildung und Berechnung. Darüber hinaus arbeiten diese Studien entweder mit stark verallgemeinernden Prämissen oder beziehen nur einzelne Handlungsfelder in die Analyse mit ein. Für regionale und lokale Entscheidungsträger liefern die Resultate damit nur Anhaltspunkte aber keine konkreten Anweisungen für Handlungen.

Ein entscheidendes Problem stellt der Umgang mit Unsicherheit dar. Sie besteht sowohl im Hinblick auf die Klimaänderungen an sich, deren Folgen, sowie auf die Auswirkungen der Klimafolgen und nicht zuletzt auch in Hinsicht auf die Wirksamkeit und die Kosten von Anpassungsmaßnahmen. Dies erschwert sowohl die Quantifizierung als auch die Monetarisierung der Klimafolgen als auch von Anpassungsmaßnahmen. Grundsätzlich liegen aber Methoden vor, die Bewertungen unter Unsicherheit ermöglichen, um Handlungsempfehlungen abzuleiten. Darüber hinaus ist Unsicherheit keine Begründung dafür, Anpassungsmaßnahmen vorläufig zu unterlassen, solange diese bestimmte Eigenschaften erfüllen.

Demnach sind Maßnahmen umso vorteilhafter, je

- größer ihr Beitrag beziehungsweise Nutzen in mehreren Handlungsfeldern ist.
- komplementärer sie sich mit anderen Maßnahmen zusammenfügen.
- stärker sie einen No-regret Charakter haben, d.h. je robuster sie gegenüber (unerwartet) veränderten Rahmenbedingungen sind oder je größer ihr unmittelbarer Nutzen ist.

Aus diesen Erwägungen folgt, dass zur Beurteilung von Maßnahmen eine fallweise Betrachtung notwendig ist. Insofern dürften lokale Kosten-Nutzen-Analysen eher geeignet sein, um handlungsrelevante Ergebnisse zu generieren. Dies gilt umso mehr, weil der Klimawandel lokal sehr unterschiedliche Konsequenzen haben kann und darüber hinaus lokal sehr unter-

schiedliche Rahmenbedingungen vorliegen. In diesem Zusammenhang liegen in den für die Freie und Hansestadt Hamburg bedeutsamen Handlungsfeldern zum Teil erprobte Methoden zur Quantifizierung und Monetarisierung von Klimafolgeschäden und partiell auch von Anpassungskosten vor. Es ist dabei anzumerken, dass eine Einteilung in Handlungsfelder methodisch nicht unproblematisch ist, da viele Aspekte handlungsfeldübergreifend sind.

Für weitergehende Arbeiten bietet es sich deshalb an, exemplarisch anhand von Fallstudien diese Methoden für einzelne Handlungsfelder oder handlungsfeldübergreifend zu demonstrieren. Dies ist mithin nach Abstimmung mit interessierten Behörden und Fachabteilungen Gegenstand von Los 2 des Gesamtgutachtens.

## Quellenverzeichnis

- Agrawala, S. (Ed.) (2007): Climate Change in the European Alps. Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management. OECD, Paris. Online verfügbar unter: <http://www.sourceoecd.org/Präsentationenvironment/9264031685>.
- Alberini, A., Chiabai, A. (2005): Urban Environmental Health and Sensitive Populations: How Much are the Italians Willing to Pay to Reduce Their Risks?, Fondazione Eni Enrico Mattei, Online verfügbar unter: <http://www.feem.it/getpage.aspx?id=1452&sez=Publications&padre=73>.
- Altvater, S.; Bouwma, I.; de Block, D.; Dworak, T.; Frelih-Larsen, A.; Görlach, B.; Hermeling, C.; Klostermann, J.; König, M.; Leitner, M.; Marinova, N.; McCallum, S.; Naumann, S.; Osberghaus, D.; Prutsch, A.; Reif, C.; van de Sandt, K.; Swart, R.; Tröltzsch, J. (2012): Adaptation Measures in the EU: Policies, Costs, and Economic Assessment. Im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Klima. [http://ecologic.eu/files/attachments/Publications/2012/altvater\\_12\\_climate\\_proofing\\_report\\_2.pdf](http://ecologic.eu/files/attachments/Publications/2012/altvater_12_climate_proofing_report_2.pdf), (Download am 25.05.2012).
- Amato, A.D. et al. (2005): Regional Energy Demand Responses to Climate Change: Methodology and Application to The Commonwealth of Massachusetts. Climatic Change, Vol. 71, 175–201.
- Berritella, M., Bigano, A., Roson, R., Tol, R. S. J. (2004): A General Equilibrium Analysis of Climate Change Impacts on Tourism. EEE Working Paper Series No. 17. Online verfügbar unter: <http://users.ictp.it/~eee/files/wp17.pdf>
- Barredo, J. I., Salamon, P. and Bódis, K. (2008): Towards an assessment of coastal flood damage potential in Europe. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 23698 EN.
- Barredo, J. I. (2009): Normalised flood losses in Europe 1970-2006. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 9, 97-104.
- Berlemann, M., Vogt, G. (2007): Kurzfristige Wachstumseffekte von Naturkatastrophen – Eine empirische Analyse der Flutkatastrophe vom August 2002 in Sachsen. In: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 31 (2), 209-232
- Berritella, M., Bigano, A., Roson, R., Tol, R. S. J. (2004): A General Equilibrium Analysis of Climate Change Impacts on Tourism. EEE Working Paper Series No. 17. Online verfügbar unter: <http://users.ictp.it/~eee/files/wp17.pdf>.
- Berry, P. (2007): Adaptation Options on Natural Ecosystems. A report to the UNFCCC Secretariat Financial and Technical Support Division. Online verfügbar unter [http://unfccc.int/cooperation\\_and\\_support/financial\\_mechanism/financial\\_mechanism\\_gcf/items/4054.php](http://unfccc.int/cooperation_and_support/financial_mechanism/financial_mechanism_gcf/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.
- Bettgenhäuser, K., Boermans, T., Offermann, M., Krechting, A., Becker, D. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Umweltbundesamt, UBA-Texte Climate Change 10/2011, Dessau-Roßlau.
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2008): Daten zur Natur 2008. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- Bigano, A., Bosello, F., Roson, R., Tol, R. S. J. (2006): Economy-wide estimates of the implications of climate change: A joint analysis for sea level rise and tourism. FEEM Working Paper Nr. 135.2006.
- Böhm, J. (2008): Potentielle Auswirkungen des Klimawandels auf die Eigenschaften und Entwicklung der Böden Schleswig-Holsteins. Eine Abschätzung anhand von Prognosen des regionalen Klimamodells WETTREG. Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover, Online verfügbar unter: <http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/BodenAltlasten>

[/035\\_Boden\\_Klimawandel/02\\_Auswirkungen\\_Boden/PDF/Diplomarbeit\\_JohannaBoehm,templateId=raw,property=publicationFile.pdf.](#)

- Bosello, F., Roson, R., Tol, R. S.J. (2005): Economy-Wide Estimates of the Implications of Climate Change: Human Health. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Venice.
- Boyd, R., Walton, H. (2006): Chapter 9: Water resources, in 'Task 3 Report—Climate change impacts and adaptations: Cross-regional research programme: Project E: Quantify the cost of future impacts'.
- Bräuer, I., Umpfenbach, K., Blobel, D., Grünig, M., Best, A., Peter, M., Lückge, H. (2009): Klimawandel: Welche Belastungen entstehen für die Tragfähigkeit der Öffentlichen Finanzen? Endbericht. Berlin.
- Brander, L. M. et al. (2011): Using Meta-Analysis and GIS for Value Transfer and Scaling Up: Valuing Climate Change Induced Losses of European Wetlands. Environmental and Resource Economics: Springer-Verlag GmbH.
- 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. Online verfügbar unter: <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2004/brandt-sassen/brandt-sassen.pdf>.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2009a): Anpassungsstrategien an den Klimawandel – Anforderungen an den Bevölkerungsschutz. Wissenschaftsforum: Band 5.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2009b): Klimawandel und Katastrophenschutz. AGBF-Fachtagung 2009, Wilhelmshaven.
- Bundesministerium der Finanzen (2010): Klimapolitik zwischen Emissionsvermeidung und Anpassung. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium der Finanzen.
- Bundesministerium des Innern (2012): Bevölkerungsschutzportal – Naturkatastrophen – Die wesentlichsten Naturkatastrophen der letzten 10 Jahre in Deutschland. [http://www.bevoelkerungsschutz-portal.de/SharedDocs/Standardartikel/BVS/DE/ohneMarginalspalte/Naturkatastrophen/wesentl\\_Naturkatastrophen.html?nn=405216](http://www.bevoelkerungsschutz-portal.de/SharedDocs/Standardartikel/BVS/DE/ohneMarginalspalte/Naturkatastrophen/wesentl_Naturkatastrophen.html?nn=405216) [zuletzt abgerufen am 19.02.12].
- Bundesministerium des Innern (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), Berlin.
- Die Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Centre for European Policy Studies (CEPS), Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) (2010): The fiscal implications of climate adaptation. No ECFIN/E/2008/008, Final report 2010.
- Ciscar, J.-C. (Hrsg.) (2009): Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project. 2009. Joint Research Centre Scientific and Technical Report. Online verfügbar unter: <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=2879>.
- Dannenberg, A., Mennel, T., Osberghaus, D., Sturm, B. (2009): The Economics of Adaptation to Climate Change – The Case of Germany. Discussion Paper No. 09-057, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim.
- Darmendrail, D. et al. (2004): Assessing the Economic Impacts of Soil Degradation - Final Report. Volume II: Case Studies and Database Research. Online verfügbar unter: [http://ecologic.eu/download/projekte/1950-1999/1962/1962\\_soil\\_economics\\_2\\_case\\_studies.pdf](http://ecologic.eu/download/projekte/1950-1999/1962/1962_soil_economics_2_case_studies.pdf).
- Daschkeit, A., Renken, A. L. (2009): Klimaänderung und Klimafolgen in Hamburg: Fachlicher Orientierungsrahmen, Gutachten des Umweltbundesamtes im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg. Online verfügbar unter: <http://klima.hamburg.de/contentblob/2317474/data/orientierungsrahmen.pdf>.

- de Bruin, K., R. B. Dellink, A. Ruijs, L. Bolwidt, A. van Buuren, J. Graveland, R. S. de Groot, P. J. Kuikman, S. Reinhard, R. P. Roetter, V. C. Tassone, A. Verhagen, E. C. van Ierland (2009): Adapting to climate change in The Netherlands: an inventory of climate adaptation options and ranking of alternatives. *Climatic Change*, Vol. 95, Nr. 1-2, 23-45.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) (2004): Costing the impacts of climate change in the UK.
- De Groot, R.S. et al. (2006): Climate adaptation in the Netherlands. Bilthoven. Online verfügbar unter: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500102003.pdf>.
- De Kok, J.-L., Grossmann, M. (2009): Large-scale Assessment of Flood Risk and the Effects of Mitigation Measures along the River Elbe. *Natural Hazards*, Nr. 52, 143-166.
- Department of Health and Health Protection Agency (2008): Health effects of climate change in the UK 2008: an update of the Department of Health report 2001/2002. Department of Health and Health Protection Agency, London.
- Dickinson, T. (2009): The Compendium of Adaptation Models for Climate Change: First Edition, Adaptation and Impacts Research Division, Environment Canada.
- Dunkelberg, E., Stegnitz, A., Hirschl, B. (2009): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels – Energiewirtschaft. Online verfügbar unter: [http://www.anpassung.net/nn\\_701074/DE/Anpassungsstrategie/Veranstaltungen/Dialoge\\_20zur\\_20Klimaanpassung/0907\\_20Energiewirtschaft/Arbeitspapier,templated=raw,property=publicationFile.pdf/Arbeitspapier.pdf](http://www.anpassung.net/nn_701074/DE/Anpassungsstrategie/Veranstaltungen/Dialoge_20zur_20Klimaanpassung/0907_20Energiewirtschaft/Arbeitspapier,templated=raw,property=publicationFile.pdf/Arbeitspapier.pdf).
- Ebi, K. (2007): Health Impact of Climate Change. A report to the UNFCCC Secretariat Financial and Technical Support Division. UNFCCC, Bonn, Germany. Online verfügbar unter: [http://unfccc.int/files/cooperation\\_and\\_support/financial\\_mechanism/application/pdf/ebi.pdf](http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/financial_mechanism/application/pdf/ebi.pdf).
- Ebi, K.L., Teisberg, T.J., Kalkstein, L.S., Robinson, L., Weiher, R.F. (2004): Heat Watch/Warning Systems Save Lives – Estimated Costs and Benefits for Philadelphia 1995-98. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(8), 1067-1073.
- 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.
- ELCON (2004): The Economic Impacts of the August 2003 Blackout Prepared by the Electricity Consumers Resource Council (ELCON) - February 9, 2004. Online verfügbar unter: <http://www.elcon.org/Documents/EconomicImpactsOfAugust2003Blackout.pdf>.
- Eskeland, G., Jochem, E., Neufeldt, H., Traber, T., Rive, N., Behrens, A. (2008): The Future of European Electricity: Choices before 2020. CEPS Policy brief, Nr. 164.
- Europäische Kommission (2006): Thematic Strategy for Soil Protection - Impact Assessment of the Thematic Strategy on Soil Protection. European Commission Staff Working Document; Document Accompanying the Communication from the Commission to the Council, The European Economic and Social committee and the Committee of the Regions Impact Assessment of the Thematic Strategy on Soil Protection.
- Europäische Umweltagentur (EEA) (2012): Towards efficient use of water resources in Europe. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union.
- Europäische Umweltagentur (EEA) (2010): The European environment – state and outlook 2010: Synthesis.
- Europäische Umweltagentur (EEA) (2008): Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment, EEA Report No. 4/2008. Online verfügbar unter: [http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2008\\_4](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_4).

- Europäische Umweltagentur (EEA) (2007): Climate change: the cost of inaction and the cost of adaptation, EEA Technical Report No. 13/2007.
- Flörke, M.; Wimmer, F.; Laaser, C.; Vidaurre, R.; Tröltzsch, J.; Dworak, T.; Stein, U.; Marinova, N.; Jaspers, F.; Ludwig, F.; Swart, R.; Giupponi, C.; Bosello, F.; Mysiak, J. (2011): Final Report for the project Climate Adaptation – modelling water scenarios and sectoral impacts. Gefördert durch die Europäische Kommission, DG Umwelt, Contract N° DG ENV.D.2/SER/2009/0034.
- Gebhardt, O., Kumke, S., Hansjürgens, B. (2011): Kosten der Anpassung an den Klimawandel – Eine ökonomische Analyse ausgewählter Sektoren in Sachsen-Anhalt. UFZ-Bericht 05/2011.
- Gerstengarbe, F.-W. et al. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report, Nr. 83. Online verfügbar unter: <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr83.pdf>.
- Hallegatte, S., Lecocq, F., de Perthuis, C. (2011): Designing Climate Change Adaptation Policies – An Economic Framework. World Bank Policy Research Paper 5568.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Wood, R. M. (2011): Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. Climatic Change, Vol. 104, Nr. 1, 113-137.
- Hallegatte, S. (2008): An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. Risk Analysis 25 (3), 779-799.
- Hallegatte, S., Henriot, F., Corfee-Morlot, J. (2008): The Economics of Climate Change Impacts and Policy Benefits at City Scale: A Conceptual Framework”. OECD Environment Working Papers, Nr. 4, OECD Publishing.
- Hamilton, A., Tinch, D., Hanley, N. (2006): Agriculture. Task 3 Report –Climate Change Impacts and Adaptation: Cross-Regional Research Programme, Project E – Quantify the cost of future impacts. Metroeconomica Limited for DEFRA.
- Hanemann, W.M., Dale, L. (2006): Economic Damages from Climate Change: An Assessment of Market Impacts. Department of Agricultural and Resource Economics, UCB, UC Berkeley, Working Paper No. 1029. Online verfügbar unter: <http://escholarship.org/uc/item/7vc6g48x>.
- Harris, D., B. Crabtree, J. King, P. Newell-Price (2006): Economic Valuation of Soil Functions. Phase 1: Literature Review and Method Development. Online verfügbar unter: [http://www.cjconsulting.co.uk/pdfs/FINALEcon%20Valuation%20of%20Soil%20Functions%20Report%20Phase%20I\\_0806.pdf](http://www.cjconsulting.co.uk/pdfs/FINALEcon%20Valuation%20of%20Soil%20Functions%20Report%20Phase%20I_0806.pdf).
- Hübler, M., Klepper, G. (2007): Kosten des Klimawandels: Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: <http://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/2kosten-des-klimawandels-die-wirkung-steigender-temperaturen-auf-gesundheit-und-leistungsfahigkeit>.
- Hunt, A., Watkiss, P. (2011): Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. Climatic Change, 104 (1), 13-49.
- Hunt, A. (2008a): Informing Adaptation to Climate Change in the UK: Some Sectoral Impact Costs. The Integrated Assessment Journal, Vol 8, Nr. 1, 41-71.
- Hunt, A. (2008b): Health case study. UK Climate Impacts Programme, Online verfügbar unter [http://www.ukcip.org.uk/wordpress/wp-content/PDFs/Coatings/cost\\_cs\\_health.pdf](http://www.ukcip.org.uk/wordpress/wp-content/PDFs/Coatings/cost_cs_health.pdf).
- ICF Consulting (2003): The Economic Cost of the Blackout. An issue paper on the Northeastern Blackout, August 13, 2003. Online verfügbar unter: <http://www.solarstorms.org/ICFBlackout2003.pdf>.
- ICF Consulting (2007): The potential costs of climate change adaptation for the water industry. Report to Environment Agency. London.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007a): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum 4. Assessment Report des IPCC, Cambridge: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007b): Klimaänderungen 2007. Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Bern/Wien/Berlin, Online verfügbar unter: <http://www.bmbf.de/pub/IPCC2007.pdf>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001): IPCC Third Assessment Report. Online verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/index.htm>.
- Jendritzky, G., Koppe, C. (2008): Die Auswirkungen von thermischen Belastungen auf die Mortalität. S. 149-153. In: Lozan, J. et al. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken; Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. GEO Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.
- Kaminski, U. (2011): Persönliche Kommunikation.
- Katastrophenschutz Hamburg (2012): Katastrophenschutz Hamburg – Innenbehörde. Online verfügbar unter: <http://www.hamburg.de/katastrophenschutz/> [zuletzt abgerufen am 27.03.12].
- Kemfert, C., Kremers, H. (2009): The Cost of Climate Change to the German Fruit Vegetation Sector. DIW Discussion Paper 857. Berlin.
- Kovats, R.S., Hunt, A., Watkiss, P. (2011): Climate change impacts on health in Europe, The Climate-Cost Project. Deliverable D2E.2 (Unpublished).
- Kreibich, H., Müller, M., Thieken, A. H., Merz, B. (2007): Flood precaution of companies and their ability to cope with the flood in August 2002 in Saxony, Germany. Water Resources Research 43, 1-15.
- Lang, G. (2001): Global Warming and German Agriculture: Impact Estimations Using a Restricted Profit Function, in "Environmental and Resource Economics", Vol. 19, Nr. 2, 97-112.
- Lindgren, E., Jaenson, T.G.T. (2006): Lyme borreliosis in Europe: influences of climate and climate change, epidemiology, ecology and adaptation measures. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark. Online verfügbar unter : [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/96819/E89522.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/96819/E89522.pdf).
- Mansanet-Bataller, M., Hervé-Mignucci, M., Leseur, A. (2008): Energy Infrastructures in France: Climate Change Vulnerabilities and Adaptation Possibilities. Mission Climate Working Paper, Nr. 2009-2, Caisse des Dépôts, Paris.
- Metroeconomica (2004): Costing the impacts of climate change in the UK: overview of guidelines. UKCIP Technical Report. UKCIP, Oxford.
- Mima, S., Criqui, P. (2011): Analysis of impacts and adaptation of the Europe, USA, China, and India Energy System in the POLES A1B and E1 case under future climate change, ClimateCost.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2011): Klimawandel und Wasserwirtschaft - Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf.
- Mücke, H.-G., Klasen, J., Schmoll, O.; Szewzyk, R. (2009): Gesundheitliche Anpassung an den Klimawandel. Umweltbundesamt, Dessau.
- Nordhaus, W. D. (2006): The economics of hurricanes in the United States. Prepared for Snowmass Workshop on Abrupt Climate Change, Snowmass: Annual Meetings of the American Economic Association.
- OECD (2008): Economic aspects of adaptation to climate change – Costs, benefits and policy instruments, hrsg. von S. Agrawala & S. Fankhauser, Online abrufbar unter [www.sourceoecd.org/environment/9789264046030](http://www.sourceoecd.org/environment/9789264046030).
- O’Neal, M.R. et al. (2005): Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. Catena, Vol. 61, 165–184.

- Olesen, J.E., Bindi, M. (2004): Agricultural Impacts and Adaptations to Climate Change in Europe. Online verfügbar unter: [http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/artigos\\_dissertacoes/artigos\\_ingles/](http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/artigos_dissertacoes/artigos_ingles/)
- Parry, M., Arnell, N., Berry, P., Dodman, D., Fankhauser, S., Kovats, S., Hope, C., Nicholls, R., Satterthwaite, D., Tiffin, R., Wheeler, T. (2009): Assessing the costs of adaptation to climate change - A review of the UNFCCC and other recent estimates. Imperial College London, Grantham Institute for Climate Change.
- Pimentel, D. et al. (1995): Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, Vol. 267, 24 February 1995, 1117-1123.
- Policy Research Corporation (2009): The economics of climate change adaptation in EU coastal areas. On behalf of the European Commission.
- Regionaler Klimaatlas (2012): <http://www.regionaler-klimaatlas.de/>.
- Rogers, D., V. Tsirkunov (2010): Costs and benefits of early warning systems. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2009): Fachliche Grundlage für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. Dresden.
- Schaller, M., Weigel, H.-J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Sonderheft 316 - Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research, Braunschweig. Online verfügbar unter: [http://www.fal.de/cln\\_045/nn\\_787784/SharedDocs/00\\_FAL/DE/Publikationen/Landbauforschung\\_Sonderheft/lbf\\_sh\\_316.html](http://www.fal.de/cln_045/nn_787784/SharedDocs/00_FAL/DE/Publikationen/Landbauforschung_Sonderheft/lbf_sh_316.html).
- Schröter, K., M. Ostrowski, C. Velasco, D.S. Torres, H.P. Nachtnebel, B. Kahl, M. Beyene, C. Rubin, M. Gocht (2008): Effectiveness and Efficiency of Early Warning Systems for Flash-Floods (EWASE). CRUE Research Report No 1-5.
- Schröter, D. et al. (2004): ATEAM – Final report. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- Sgobbi, A., Carraro, C. (2008): Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in Italy. An Economic Assessment. FEEM Working Paper No. 170.2008.
- Simmons, K.M., Sutter, D. (2005): WSR-88D Radar, Tornado Warnings, and Tornado Casualties. *Weather and Forecasting*, 20(3), 301-310.
- SoCo Project Team (2009): Final report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)'. Online verfügbar unter: <http://soco.jrc.ec.europa.eu/documents/EUR-23820-web.pdf>.
- Stern, N. (2006): The Economics of Climate Change. The Stern Review. Cambridge University Press.
- Stock, M. (Hrsg.) (2005): KLARA – Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung. PIK Report Nr. 99, Potsdam.
- Sueddeutsche.de (2012): Alarmierende Studie – Deutschland für Fukushima-Unfall nicht gerüstet. Online verfügbar unter: <http://www.sueddeutsche.de/wissen/alarmierende-studie-deutschland-fuer-fukushima-unfall-nicht-geruestet-1.1311648> [zuletzt abgerufen am 29.03.12]
- Teisberg, T.J., Weiher, R.F. (2009): Background Paper on the Benefits and Costs of Early Warning Systems for Major Natural Hazards.
- Thomas, C. D. et al. (2004): Extinction risk from climate change. *Nature*, Vol. 427, 8 January 2004, 145-148.
- Titus, J.G. (1992): The Costs of Climate Change to the United States. Originally published in: Majumdar, S.K., L.S. Kalkstein, B. Yarnal, E.W. Miller, and L.M. Rosenfeld (eds). *Global Climate Change: Implications, Challenges, and Mitigation Measures*. Pennsylvania Academy of Sciences.

- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4298.html>.
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2011): Ökonomische Aspekte der Anpassung an den Klimawandel. Literaturoberwertung zu Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Umweltbundesamt, Dessau. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4185.html>.
- Umweltbundesamt (2008): Böden im Klimawandel - Was tun?! UBA-Workshop am 22./23. Januar 2008, Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/veranstaltungen/ws080122/index.htm>.
- Van Ierland, E.C., de Bruin, K., Dellink, R.B., Ruijs, A. (2007): A qualitative assessment of climate adaptation options and some estimates of adaptation costs. Routeplanner Report 3.
- Watkiss, P., Horrocks, L., Taylor, P. (2006): Energy. Task 3 Report – Climate Change Impacts and Adaptation: Cross-Regional Research Programme, Project E – Quantify the cost of impacts and adaptation. Metroeconomica Limited for DEFRA.
- Watkiss, P., Horrocks, L., Pye, S., Searl, A., Hunt, A. (2009): Impacts of climate change in human health in Europe. PESETA-Human health study. Published by European Communities.
- Wilbanks, T.J., Bhatt, V., Bilello, D.E., Bull, S.R., Ekmann, J., Horak, W.C., Huang, Y.J., Levine, M.D., Sale, M.J., Schmalzer, D.K., Scott, M.J. (2008): Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 4.5, Washington, DC.
- Wurbs, D., Steininger, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden: Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Umweltbundesamt, UBA-Texte Climate Change 16/2011, Dessau.
- United States General Accounting Office (GAO) (1999): National Weather Service Modernization and NOAA Fleet Issues. GAO/T-AIMD/GGD-99-97.
- UNFCCC (2009): Potential costs and benefits of adaptation options: A review of existing literature. UNFCCC Technical Paper, FCCC/TP/2009/2.
- Zebisch, M. et al. (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt, UBA-Texte Climate Change 08/2005, Dessau.
- Zhu, X. van Ierland, E. (2010): Report on review of available methods for cost assessment. MEDIATION Delivery No. D 3.1, 13<sup>th</sup> September 2010.



Hamburgisches  
WeltWirtschafts  
Institut



## Los 2: Fallstudien

Max Grünig, Julia Kowalewski, Sven Schulze, Jenny Tröltzsch

18. Juni 2012

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Überblick</b> .....	91
1.1	Einleitung.....	91
1.2	Fallstudienauswahl und Überblick .....	91
<b>2</b>	<b>Fallstudie 1: Handlungsfeld Wasserwirtschaft – Steigende Grundwasserstände</b> .....	95
2.1	Beschreibung der Maßnahme .....	95
2.2	Kosten- und Nutzenbewertung .....	97
	2.2.1 Kostenschätzung .....	97
	2.2.2 Bewertung der Nutzen .....	98
	2.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen .....	101
2.3	Bewertung der Maßnahme .....	102
2.4	Fallstudienliteratur .....	104
<b>3</b>	<b>Fallstudie 2: Handlungsfeld Bauen – Grüne Dächer für Hamburg</b> .....	106
3.1	Beschreibung der Maßnahme .....	106
3.2	Kosten- und Nutzenbewertung .....	107
	3.2.1 Kostenschätzung .....	108
	3.2.2 Bewertung der Nutzen .....	111
	3.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen .....	116
3.3	Bewertung der Maßnahme .....	117
3.4	Fallstudienliteratur .....	118
<b>4</b>	<b>Fallstudie 3: Handlungsfeld Landwirtschaft – Angepasste Sortenwahl</b> .....	120
4.1	Beschreibung der Maßnahme .....	120
4.2	Kosten- und Nutzenbewertung .....	122
	4.2.1 Kostenschätzung .....	124
	4.2.2 Bewertung der Nutzen .....	126
	4.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen .....	129
4.3	Bewertung der Maßnahme .....	130
4.4	Fallstudienliteratur .....	132
<b>5</b>	<b>Fallstudie 4: Handlungsfeld Katastrophenschutz – Der Starkregen im Juni 2011</b> .....	134
5.1	Problemstellung .....	134
5.2	Ereignisverlauf .....	135
5.3	Vorgehen .....	136
	5.3.1 Schadenskategorien .....	139
	5.3.2 Schadensbeschreibung .....	139
	5.3.2.1 Schäden an öffentlichen Gebäuden und Infrastruktur .....	139
	5.3.2.2 Schäden der Haushalte .....	140
	5.3.2.3 Schäden der Unternehmen .....	141
5.4	Kostenschätzung .....	142
	5.4.1 Richtwerte für die Schadenshöhen .....	142
	5.4.2 Schadenskalkulation .....	147
5.5	Mögliche Anpassungsmaßnahmen .....	149
5.6	Fazit und Handlungsempfehlungen .....	151
5.7	Fallstudienliteratur .....	153
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	155

# **1 Einleitung und Überblick**

## **1.1 Einleitung**

Im ersten Teil des Gesamtgutachtens wurde ein Überblick zu den grundsätzlichen Fragen und Problemen der Ökonomie der Klimaanpassung gegeben. Ferner wurden für die einzelnen Handlungsfelder der Klimaanpassung mögliche Konsequenzen des Klimawandels, deren Kosten sowie Anpassungsmaßnahmen und -kosten aufgeführt. In diesem Zusammenhang zeigte sich, dass das Wissen in diesem Bereich in jüngster Zeit zwar immens zugenommen hat, so dass ein vollständiger Überblick nicht möglich war. Das hohe Aggregationsniveau der meisten Studien bedingt jedoch auch, dass sie hinsichtlich konkreter Maßnahmen oft wenige Hinweise liefern können. Folglich werden im vorliegenden zweiten Teil des Gesamtgutachtens exemplarisch Fallstudien analysiert, die Anhaltspunkte für ein methodisches Vorgehen bei Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen geben sollen. Dabei wird zweierlei deutlich: Erstens hängt die fundierte Beurteilung einer Maßnahme nicht nur von Unsicherheiten sondern schlichtweg von der Verfügbarkeit von Informationen und Daten ab. Zweitens müssen Maßnahmen einerseits fallbezogen untersucht werden, andererseits müssten auch Interdependenzen zwischen Maßnahmen und Handlungsfeldern berücksichtigt werden. Letzteres liegt jenseits dessen, was im Rahmen dieses Gutachtens möglich war.

Bevor in den Kapiteln 2.-5. insgesamt vier Fallstudien für Hamburg untersucht werden, wird im folgenden Unterabschnitt das Vorgehen bei ihrer Auswahl und Bearbeitung beschrieben.

## **1.2 Fallstudienauswahl und Überblick**

Am 26.01.2012 fand in den Räumlichkeiten der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg eine Auftaktveranstaltung zum Gesamtprojekt statt. Dabei waren neben dem Projektkonsortium Vertreter verschiedener Behörden, Ämter und Hamburger Bezirke anwesend. Ziel war neben der Vorstellung des Projektes die Identifikation möglicher Fallstudien. Dabei erfolgte soweit möglich eine Orientierung an den Handlungsfeldern des Fachlichen Orientierungsrahmens. Allerdings zeigte sich auch hier erneut, dass eine eindeutige Trennung der verschiedenen Handlungsfelder ebenso schwierig ist wie eine direkte Zuordnung der jeweiligen Zuständigkeiten.

Zu den Fallstudien im Einzelnen wurden nach dem ersten Abstimmungsprozess Kurzbeschreibungen als Grundlage für die weitere Arbeit verfasst. Deren Fassungen vom 05.03.2012 sind im Folgenden aufgeführt:

### **1. Wasserwirtschaft: Steigende Grundwasserstände**

Im Rahmen des Klimawandels werden stärkere und häufigere Starkregenereignisse sowie eine Verschiebung der Niederschläge in den Winter vorhergesagt. Es wird erwartet, dass diese Entwicklung den bereits vorliegenden Trend zu höheren Grundwasserspiegeln in Hamburg verstärkt. Folge können vermehrte Kellervernässungen und Gebäudeschäden sein. Bei der ökonomischen Betrachtung können diese erwarteten Schäden den Kosten einer gebietsbezogenen Grundwasserstandsregulierung gegenübergestellt werden. Eine Betrachtung könnte anhand eines oder mehrerer kleiner Pilotgebiete (ca. 1 km<sup>2</sup>) durchgeführt werden. Kosten und Nutzen der Maßnahme werden aus gesamtwirtschaftlicher Sicht betrachtet. Fragen der Kostenzurechnung und verteilungspolitische Wirkungen werden nicht berücksichtigt.

### **2. Bauen: Gründächer**

Diese Maßnahme zielt auf eine Minderung des Wärmeinsel-Effekts in Städten ab. 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. Ebenfalls dämmen Gründächer die Abflussspitzen bei Starkregenereignissen. Schließlich können Gründächer auch den Anstieg der Gebäude-Innentemperatur mindern. Eine ökonomische Betrachtung kann auf einer relativ allgemeinen Ebene für das gesamte Stadtgebiet erfolgen und dabei an einem Zielanteil an Gründächern angelehnt werden. Eine zweite Variante ist die Bearbeitung eines konkreten Beispiels (Gebäude/ -komplex) für welchen die Wirkungen konkreter erfasst werden können. Die Abschätzung der Wärmereduktion von Gründächern würde hier anhand von anderen Studien auf das Beispiel übertragen werden. Für die Berechnung der Kosten- und Nutzen ist vor allem von Belang, ob die Studie aus einer volkswirtschaftlichen Gesamtsicht oder aber aus der Perspektive des Gebäudeeigentümers erstellt werden soll. Wir verfolgen einen gesamtgesellschaftlichen Kosten-Nutzen-Ansatz, werden jedoch auch die einzelwirtschaftliche Perspektive berücksichtigen.

### 3. Landwirtschaft: Sortenanpassung im Obstanbau

Durch eine Verschiebung der Niederschlagsmengen vom Sommer- in das Winterhalbjahr sowie die Zunahme von Trockenperioden und stärkere und häufigere Starkregenereignisse ist die Landwirtschaft auch in Hamburg betroffen. Eine Umstellung auf andere Anbausorten kann die Auswirkungen allerdings reduzieren. In der Fallstudie könnten die (Mehr-)Kosten einer Sortenumstellung und eventuell dabei eintretende Ertragsverluste dem Nutzen durch vermiedene Schadenskosten beim Eintritt der Ereignisse verglichen werden. In dieser Fallstudie werden wir explizit die Kosten und Nutzen für den Entscheider einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung gegenüberstellen

### 4. Katastrophenschutz bei Starkregenereignissen

Sowohl die Erwartung künftig häufiger und/oder stärker auftretender extremer Wetterereignisse als auch die Beobachtung der Konsequenzen vergangener Extremwetterlagen erklären die Notwendigkeit, (ökonomische) Aspekte des Katastrophenschutzes näher zu untersuchen. Aufgrund der Vielzahl der betroffenen Einzelbereiche ist die Analyse einzelner oder integrierter Anpassungsmaßnahmen derzeit aber kaum möglich. Anhaltspunkte für die Umsetzung von spezifischen Maßnahmen können allerdings die Schäden eines bestimmten Ereignisses liefern. Wir schlagen deshalb vor, anhand des Starkregenereignisses vom 06.06.2011 die damit verbundenen Kosten – differenziert nach betroffenen Bereichen – abzuschätzen.

Nach internen Beratungen des Projektkonsortiums wurde folgende Zuständigkeit für die Anfertigung der Fallstudien vereinbart:

<b>Fallstudie</b>	<b>Bearbeiter</b>
1. Wasserwirtschaft: Steigende Grundwasserstände	Ecologic Institut
2. Bauen: Gründächer	Ecologic Institut
3. Landwirtschaft: Sortenanpassung im Obstanbau	Ecologic Institut
4. Katastrophenschutz bei Starkregenereignissen	HWWI

Zur weiteren Bearbeitung der Fallstudien zählte die Kontaktaufnahme mit Behörden- und Amtsvertretern, die darüber hinausgehende Informationsbeschaffung sowie die Durchführung von Berechnungen und das Abfassen der jeweiligen Texte.

Aufgrund ihres Querschnittcharakters bedurfte die Fallstudie 4 eines weiteren Treffens mit Vertretern des Hamburger Katastrophenschutzes. Dieses Treffen fand am 22.03.2012 erneut in den Räumlichkeiten der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg statt. Nach lebhaften Diskussionen und thematischen Alternativvorschlägen verständigte man sich schließlich darauf, den Zuschnitt der Fallstudie wie oben beschrieben zu belassen.

Alle anderen darauf folgenden Kontaktaufnahmen erfolgten in allen Fallstudien telefonisch oder schriftlich per E-Mail.

Um den separaten Charakter der Fallstudien zu betonen, sind diese nicht einheitlich gegliedert. Stattdessen spiegeln die Strukturen, das jeweilige Vorgehen und die eigenständigen Literaturverzeichnisse die Heterogenität der einzelnen Fallstudien wider.

## **2 Fallstudie 1: Handlungsfeld Wasserwirtschaft – Steigende Grundwasserstände**

### **2.1 Beschreibung der Maßnahme**

Für die verschiedenen Regionen Deutschlands sind die Projektionen zum Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung sehr unterschiedlich: teilweise wird von einer Erhöhung, teilweise von einer Minderung der Grundwasserneubildung ausgegangen. Die Ganglinien des Grundwasserstandes zeigen in der Regel auch heute jahreszeitliche Schwankungen, die oft von mehrjährigen Fluktuationen überlagert werden und sich periodisch wiederholen. Verschiedene Faktoren sind ausschlaggebend für diese Bewegungen, zum Beispiel der Anteil des Niederschlags, der in den Boden versickert, der Abstand zwischen Gelände und Grundwasser, die Beschaffenheit der Deckschichten über dem Grundwasser und die Größe und Art der Hohlräume im Gestein. Hinzu kommt, dass Grundwasserkörper, die der Trink- oder Brauchwasserentnahme unterliegen, in erheblichem Maße von der Intensität dieser Nutzung beeinflusst werden (Euler et al. 2009).

Bereits heute bestehen Probleme durch einen Grundwasseranstieg in mehreren deutschen Regionen, zum Beispiel im Hessischen Ried, in der Vorderpfalz und Rheinhessen, in den Schotterebenen Südbayerns sowie in weiten Teilen Nordrhein-Westfalens. Weiterhin sind Großstädte wie Berlin, Hamburg, München aber auch Ortschaften, wie Kaarst und Korschbroich bei Neuss betroffen. Die Folgen zeigen sich in der Form von nassen Kellern und Problemen in der Landwirtschaft. Die Grundwasserstände liegen in vielen Orten seit 1999 über der Kellersohle. Die Ursachen dafür sind vielfältig, wobei sie künstlicher oder natürlicher Art sein können. Zu nennen sind unter anderem hohe Niederschläge, sinkende Fördermengen der Wasserwerke oder in der Industrie sowie eine Kombination aus beiden. Darüber hinaus haben eine laufende oder beendete Grundwasserhaltungen im Bergbau oder bei größeren Baumaßnahmen einen Einfluss (Grundwasser-Online 2003, Grimmer 2006).

Auch aus London wird von einem steigendem Grundwasserspiegel berichtet. Allerdings liegt hier das Problem in einer Übernutzung der Grundwasserreserven zu Beginn der 1950er Jahre, wodurch der Grundwasserstand um mehr als 70 m abgesunken ist. Seit Mitte der 1960er Jahre ist die Grundwasserentnahme deutlich zurückgegangen, so dass inzwischen bereits ein Wiederanstieg von 50 m zu verzeichnen ist, wobei der jährliche Anstieg bei circa 2 m liegt (Jones 2012).

In Hamburg liegt das Grundwasser in vielen Teilen der Stadt bereits 2 Meter oder sogar noch tiefer unter der Geländeoberfläche. In Gebieten mit Bebauung kann sich daraus Kellervernässung ergeben, d.h. in Gebäude eindringendes Grundwasser auftreten (BSU 2012).

Das oberflächennahe Grundwasser, das vom Niederschlag stark beeinflusst wird, schwankt jahreszeitlich, aber auch langfristig um mehrere Meter. Aufgrund der Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr (November bis April) liegen im jahreszeitlichen Ablauf die höchsten Grundwasserstände normalerweise im Februar bis Mai vor. Besonders hohe Grundwasserstände konnten in Hamburg in den Frühjahren 1981, 1988, 1994/95, 2002 und Anfang 2008 beobachtet werden (BSU 2012).

Der Klimawandel wird diese Entwicklung mit relativ großer Sicherheit weiter verschärfen. Das Norddeutsche Klimabüro (2012) schätzt für die Metropolregion Hamburg den mittleren Anstieg der Regenmenge für die Jahre 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 auf 5 %. Neben dem Gesamtanstieg der Niederschlagsmenge verschieben sich die Niederschläge voraussichtlich deutlich vom Sommer in den Herbst, den Winter und das Frühjahr. Im Winter, wo momentan schon die höchste Gefährdung durch einen hohen Grundwasserspiegel besteht, sollen die Niederschläge im Mittel um 22 % ansteigen (1971-2011, im Vergleich zu 1961-1990). Weiterhin wird bereits für den Jahresabschnitt 2036 bis 2065 (im Vergleich zu 1961-1990) ein mittlerer Anstieg der winterlichen Niederschlagsmenge um 8 % vorhergesagt.

Hohe Grundwasserstände können Schäden an Gebäuden verursachen, sofern der Grundwasserstand oberhalb der Kellersohle liegt. Als Gegenmaßnahme kommt eine gebietsbezogene Grundwasserregulierung in Betracht. Alternativen sind objektorientierte Maßnahmen an betroffenen Gebäuden oder auch an Infrastruktureinrichtungen, vor allem der Verkehrsinfrastruktur. Objektorientierte Maßnahmen zur Abdichtung von Gebäuden sind besonders für Neubauten geeignet (zum Beispiel Bitumenbahnen, die Bauteile im Kontakt mit Erdreich umschließen oder Beton mit hohem Wassereindringwiderstand). Es können aber auch Maßnahmen, allerdings mit hohem Aufwand, bei Bestandsbauten angewandt werden.

Für diese Fallstudie soll in Absprache mit dem Auftraggeber eine gebietsbezogene Grundwasserregulierung als Anpassungsmaßnahme betrachtet werden.

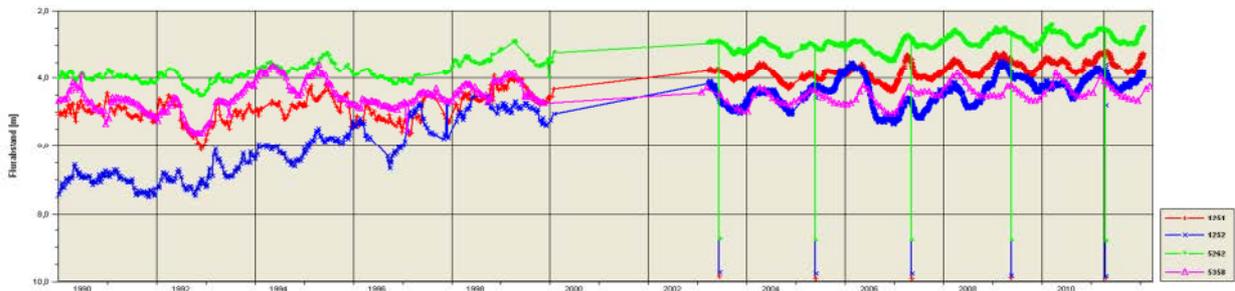
## 2.2 Kosten- und Nutzenbewertung

Für die weiteren Betrachtungen haben wir den Stadtteil Hamburg Fuhlsbüttel als Pilotgebiet ausgewählt. Er liegt im Bezirk Hamburg-Nord und hat durch den Flughafen eine besondere Bedeutung für die Stadt Hamburg. Der Stadtteil umfasst 6,6 km<sup>2</sup>, wovon die Hälfte zum Flughafen gehört. Im Stadtteil wohnen 11.979 Einwohner (Stand: 31.12.2010, Statistikamt Nord 2011).

Für den Stadtteil stellt sich die Problematik eines hohen Grundwasserspiegels zum Teil heute schon. Eine Gefährdung liegt in Form von Kellervernässung bei Wohngebäuden, bei Gewerbegebäuden, aber auch auf den Zufahrtsstraßen zum Flughafen vor (Classen 2012).

Die Flurabstandsentwicklungen bei Messstellen in Fuhlsbüttel sind im Folgenden aufgeführt. Messstellen 1251, 1252 und 5262 stellen tiefe Grundwasserleiter (>100 m) dar. Die Messstelle 5358 zeigt die Werte des oberflächennahen Grundwassers. Es ist über die letzten 20 Jahre eine eindeutig ansteigende Tendenz zu erkennen.

**Abbildung 1: Flurabstandsentwicklung an den Messstellen 1251, 1252, 5262, 5358.**



Quelle: Classen (2012).

### 2.2.1 Kostenschätzung

Grundlage der Kostenabschätzung ist die Einrichtung einer gebietsbezogenen Grundwasserregulierung. Diese existiert bereits in einigen deutschen Großstädten, unter anderem sind in Berlin zwei Anlagen in Betrieb. Die Informationen über Investitions- und Wartungskosten, beziehungsweise Stromkosten für diese Anlagen sind allerdings sehr begrenzt.

Für die beiden Berliner Grundwasserregulierungsanlagen in Mahlsdorf-Kaulsdorf und im Rudower Blumenviertel konnten grobe Daten gefunden werden. Beide Anlagen wurden Mitte der 1990er Jahre gebaut. Die Gründe für den ansteigenden Grundwasserstand und damit die

Notwendigkeit für diese Anlagen lagen in einem geringeren Wasserverbrauch in der Industrie und in Haushalten, vor allem in Ostberlin.

Die Grundwasserregulierungsanlage in Mahlsdorf-Kaulsdorf umfasst die Regulierungsanlage und 27 Brunnen. Für diese Anlage betragen die Investitionskosten 1,5 Mio. Euro (Abgeordnetenhaus Berlin 2009a). Das Abgeordnetenhaus Berlin (2009b) gibt die jährlichen Ausgaben für die Pacht des Geländes mit 1.400 Euro/Jahr und die Stromkosten mit 300 Euro pro Jahr an. Die Grundwasserregulierungsanlage im Rudower Blumenviertel wurde 1994 für einen temporären Einsatz eingerichtet. Die Anlage wird heute noch betrieben und es konnten damit zahlreiche Kellerwasserschäden durch ansteigendes Grundwasser verringert werden. Es konnten keine genauen Angaben zur Größe der Anlage gefunden werden, aber es werden durch sie 600 Keller und 10.000 Personen vor Schäden bewahrt. Die Investitionskosten für die Anlage lagen bei 3,5 Mio. Euro (Abgeordnetenhaus Berlin 2012, Melzer 2011).

Leider liegen für die beiden Anlagen keine weiteren Daten über ihre Kapazität vor, so dass ein Transfer auf den Standort in Hamburg nicht möglich ist. Grob kann aber abgeleitet werden, dass die Investitionskosten eine wesentliche Kostenkomponente darstellen, die wiederum entscheidend von der Größe der Anlage abhängt. Die anfallenden jährlichen Kosten hängen stark von möglichen Alternativnutzungen der Fläche und davon ab, ob Pacht für die Flächen anfällt. Die Stromkosten sind relativ gering und vermutlich für den öffentlichen Haushalt gut tragbar.

### ***2.2.2 Bewertung der Nutzen***

Als Nutzenkomponenten für eine gebietsbezogene Grundwasserregulierung betrachten wir vermiedene Schäden an Wohn- und Gewerbegebäuden. Darüber hinaus können Schäden an der Verkehrsinfrastruktur und die damit einhergehenden Opportunitätskosten bei beeinträchtigter Nutzung der Verkehrswege betrachtet werden. Darüber hinaus fallen bei einem erhöhten Grundwasserspiegel auch Schäden an Kulturgütern an. In dem Untersuchungsgebiet Fuhlsbüttel liegt die „Gedenkstätte Konzentrationslager und Strafanstalten Fuhlsbüttel 1933-1945“, welche eventuell ebenfalls bedroht wäre.

In die folgende Nutzenbewertung werden aufgrund der Datenlage und der begrenzten Möglichkeit der Nutzenbestimmung von Kulturgütern die folgenden beiden Komponenten einbezogen:

- Vermiedene Gebäudeschäden bei Wohngebäuden und
- Opportunitätskosten für die zeitlichen Verzögerungen bei einer beeinträchtigten Verkehrsinfrastruktur.

### ***Vermiedene Gebäudeschäden***

Die Datenlage für Schäden durch Kellervernässung stellte sich als sehr schwierig dar. Es wurden nur wenige Quellen gefunden, bei denen eine Schadenshöhe pro Keller beziehungsweise Gebäude oder m<sup>2</sup> angegeben war. Die Quellen beziehen sich meist auf Hochwasserereignisse, bei denen Gebäudeschäden erfasst wurden. Daten zu Kellervernässungen aufgrund von hohen Grundwasserspiegeln waren nicht zu finden.

Für die Stadt Ahlen wurden die Schäden einer Sturzflut im Jahr 2001 ausgewertet. Müller (o. J.) trennt die Gebäudeschäden in einen Mittelwert für diejenigen Gebäude, bei denen nur der Keller betroffen war, und andere Gebäude, bei denen ebenfalls das Erdgeschoss überschwemmt wurde. Im Mittel wurde die Überflutung eines Kellers mit 3.000 Euro pro Gebäude angegeben, für Überflutungen inklusive des Erdgeschosses lag dieser Wert bei 23.000 Euro pro Gebäude. Grothmann et al. (2009) leiten daraus einen Mittelwert von 10.000 Euro pro Gebäude ab, berechnet anhand der Anzahl der betroffenen Gebäude.

Analog zur Fallstudie zu Starkregen bietet sich die URBAS Fallstudie für Hamburg als Quelle an. Bei dieser wurde für 1.000 vollgelaufene Keller ein Schaden von 7,74 Mio. Euro angenommen, was 7.740 Euro pro Keller entspricht (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer 2008).

Weiterhin wurden im Projekt XtremRisk<sup>3</sup> Schadenkosten für Einfamilienhäuser im Stadtteil Wilhelmsburg berechnet. Die Ergebnisse ergeben für ein Einfamilienhaus mit Keller bei einem Wasserstand von 20 cm Schäden in Höhe von 9.400 bis 28.000 Euro. Diese Kosten umfassen sowohl direkte Schäden am Gebäude, als auch am Inventar sowie Kosten für die Trocknung und Reinigung der Gebäude. Eine weitere Studie von Faber et al. (2005) nimmt für ein Überflutungsereignis mit schwacher Intensität (Wasserstand im Gebäude kleiner als 0,5 m) einen Schaden an einem Ein- oder Zweifamilienhaus in Höhe von 8.402 Euro an.

---

<sup>3</sup> Informationen von Gehad Ujeyl, Institut für Wasserbau der TUHH.

Für unsere Berechnung scheinen sich die Daten von Müller (o. J.) und Faber et al. (2005) am besten zu eignen, da die Betrachtung von Wohngebäuden (Ein- bis Zweifamilienhaus) für einen Wasserschaden im Keller mit einer Höhe von unter 0,5 m durchgeführt wird. Die verwendete Schadensspanne liegt somit zwischen 3.000 und 8.402 Euro pro Schadensereignis.

Da in Fuhlsbüttel bereits heute in niederschlagsreichen Jahren eine akute Gefahr von winterlichen hohen Grundwasserständen mit der Folgen von Kellervernässung und Beeinträchtigung der Infrastruktur vorliegt, soll angenommen werden, dass – unter Verwendung der Szenarien des Norddeutschen Klimabüros (2012) – ohne weitere Gegenmaßnahmen bereits ab 2036 jedes Jahr im Winterhalbjahr Schäden durch hohen Grundwasserstand eintreten werden.

Daten des Statistikamtes Nord (2011) geben für Fuhlsbüttel 2.076 Wohngebäude an. Wenn angenommen wird, dass 50 % der Gebäude von den hohen Grundwasserständen betroffen sind, entsteht für die oben genannte Schadenshöhen (3.000 bis 8.402 Euro pro Ereignis und Gebäude) ein Schaden von 3,1 bis 8,7 Mio. Euro pro Jahr (ab 2036).

### ***Opportunitätskosten bei Straßensperrungen***

Eine zweite Schadenskomponente tritt auf, wenn die Verkehrsinfrastruktur betroffen ist. In Fuhlsbüttel ist vor allem der Verkehr zum Flughafen gefährdet. Classen (2012) erwähnt, dass bereits heute eine Gefährdung der Flughafenumgehungsstraße (B443) besteht. Bei einem weiter ansteigenden Grundwasserspiegel könnte es regelmäßig zu Verzögerungen aufgrund von Baustellen oder Teilsperren der Straße kommen, zum Beispiel wenn das austretende Grundwasser gefriert. Es soll angenommen werden, dass ab 2036 jedes zweite Jahr eine solche Gefährdungslage auftritt. Eine Beeinträchtigung erfolgt im Mittel für einen Tag pro Jahr. Die gesperrten Straßen führen dabei zu einer Zeitverzögerungen für die transportierten Güter und Personen. Diese Zeitverzögerung soll anhand der Opportunitätskosten bewertet werden. Für die Fallstudie konzentrieren wir uns auf Personen, die zum Flughafen unterwegs sind. Wir rechnen maximal mit einer Verzögerung von 30 Minuten, welche vermutlich besonders bei starkem Verkehrsaufkommen auftritt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Verzögerung für den Gütertransport noch keine weitreichenden Folgen hat, daher wird der Güterverkehr nicht berücksichtigt.

Nach Daten der Flughafen Hamburg GmbH (2011) hat der Flughafen pro Jahr 12,96 Mio. Passagiere (Stand: 2010). Davon reisten zwischen 2008 und 2010 10 Mio. mit der S-Bahn an, dies entspricht 3 Mio. Passagieren pro Jahr, die nicht per Auto anreisen und somit nicht von einer Verzögerung betroffen wären. Die restlichen ca. 10 Mio. Fluggäste sollen als Basis für unsere Berechnung gleichmäßig über alle Tage des Jahres verteilt fliegen, so dass 26.370 Fluggäste pro Tag anreisen. Wenn diese jeweils eine 30-minütige Verzögerung aufweisen, bedeutet dies insgesamt 13.200 Stunden an Wartezeit.

Die Opportunitätskosten für Wartezeiten sind schwierig zu bestimmen, da sie individuell sehr unterschiedlich sind. Allerdings werden diese inzwischen standardmäßig für die Nutzenberechnung im Straßenbau benutzt. Im Projekt HEATCO wurden Werte für eingesparte Reisezeiten (Value of travel time savings (VTTS)) für alle EU-Staaten konsolidiert und Empfehlungen ausgesprochen, dabei wurden sowohl echte Kosteneinsparungen als auch Zahlungsbereitschaften, meist bestimmt durch Befragungen, einbezogen. Für Deutschland liegen die VTTS für die Freizeit zwischen 6,74 und 10,32 Euro/Stunde und für Geschäftsreisende bei 27,86 Euro/Stunde (HEATCO 2006). Die Flughafen Hamburg GmbH (2011) gibt an, dass 40 % der Reisenden am Flughafen Hamburg Geschäftsreisende sind.

Auf dieser Datenbasis werden die Opportunitätskosten für die Zeitverzögerung für den Anteil der Privatreisenden mit 53.300 bis 81.600 Euro pro Jahr und für Geschäftsreisende mit 147.000 Euro pro Jahr berechnet.

### ***2.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen***

Ein exakter Vergleich der Kosten und Nutzen der Anpassungsmaßnahme „Einrichtung einer Grundwasserregulierung“ kann hier nicht stattfinden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kosten der Installation einer Grundwasserregulierungsanlage voraussichtlich im einstelligen Millionenbereich liegen. Die jährlichen Kosten sind sehr stark von weiteren Komponenten, wie von Konflikten bei der Flächennutzung beziehungsweise Eigentumsverhältnissen der Flächen abhängig.

Aufgrund des effektiven Einsatzes einer gebietsbezogenen Grundwasserregulierung zeigen Praxisbeispiele, dass Wasserschäden an Kellern und Infrastruktur vollständig vermieden werden können.

Die beiden hier berechneten Nutzenkomponenten einer Grundwasserregulierung in Fuhlsbüttel betragen zusammen 3,3 bis 9,0 Mio. Euro pro Jahr (ab 2036).

Hiervon entfallen 200.000 bis 229.000 Euro pro Jahr (ab 2036) auf vermiedene Zeitverzögerungen durch Beeinträchtigungen der Verkehrsinfrastruktur und 3,1 bis 8,7 Mio. Euro ab 2036 pro Jahr für vermiedene Schäden an Wohngebäuden.

Darüber hinaus liegen weitere hier nicht einbezogene Nutzenkomponenten vor, wie Schäden an Gewerbegebäuden oder der Schutz von Kulturgütern.

Es ist somit davon auszugehen, dass der Nutzen einer Grundwasserregulierung in Fuhlsbüttel über den Kosten liegen würde und die Maßnahme aus volkswirtschaftlicher Sicht für die Umsetzung in Betracht zu ziehen ist. Die meisten einbezogenen Nutzenkomponenten liegen aber auf Ebene von Privatpersonen vor. Es ist zu diskutieren, inwieweit auch öffentliche Gebäude, wie Schulen oder die ASKLEPIOS Klinik Nord, und damit auch öffentliche Leistungen und Aufgaben der Grundversorgung der Bevölkerung betroffen sind.

Die Ergebnisse für Fuhlsbüttel können nur bedingt auf andere betroffene Hamburger Stadtteile übertragen werden. Auf der einen Seite ist die Wohnbebauung pro Fläche in Fuhlsbüttel relativ gering, so dass in dichter besiedelten Gebieten die vermiedenen Gebäudeschäden ansteigen könnten. Andererseits ist die Anfahrt zum Flughafen natürlich von besonderer Bedeutung und zusätzlich sehr stark frequentiert. Diese Nutzenkomponente würde für andere Stadtteile wesentlich geringer ausfallen. Gleichwohl spielt sie in Relation zu den Gebäudeschäden bereits in Fuhlsbüttel nur eine untergeordnete Rolle.

### **2.3 Bewertung der Maßnahme**

Die Maßnahme der gebietsbezogenen Grundwasserregulierung zeigt eine sehr hohe Effektivität. Es wird davon ausgegangen, dass der größte Teil der Schäden vermieden werden kann. Im Zusammenhang mit Mitnahmeeffekten der Maßnahme sind vor allem Alternativen zu diskutieren. In anderen Städten, wie in Berlin, waren die öffentlichen Aktivitäten in den letzten Jahren deutlich stärker auf objektorientierten Schutz und die Stärkung der Eigenvorsorge durch Gebäudebesitzer (Privatpersonen und Unternehmen) orientiert. Es wurde sogar angekündigt mehrere Grundwasserregulierungsanlagen abzubauen, da diese nur auf eine zeitlich befristete Nutzung ausgelegt waren. Auf diese Bestrebungen reagierten die Bewohner mit großem Widerstand, seit mehreren Jahren wird dieses Thema bereits im Berliner Abgeord-

netenhaus diskutiert. Es sollte somit eine Abwägung zwischen einer gebietsbezogenen Grundwasserregulierung und der öffentlichen Unterstützung von objektorientierten Maßnahmen getroffen werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz für eine Grundwasserregulierung wird als hoch eingeschätzt, da betroffene Akteure deutlich entlastet werden. Allerdings kommt die Installation einer gebietsbezogenen Grundwasserregulierung einer langfristigen Verpflichtung der öffentlichen Hand gleich. Selbst bei einer veränderten Gefährdungslage ist bei einer Einstellung der Anlagen mit dem Widerstand der Anwohner zu rechnen, d.h. die Maßnahme ist schlecht umkehrbar und nicht flexibel.

## 2.4 Fallstudienliteratur

- Abgeordnetenhaus Berlin (2009a): Wortprotokoll: Ausschuss für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, 49. Sitzung 28. September 2009. Online verfügbar unter <http://www.parlament-berlin.de/ados/16/GesUmVer/protokoll/guv16-049-wp.pdf>, (Download am 05.06.2012).
- Abgeordnetenhaus Berlin (2009b): Kleine Anfrage des Abgeordneten Mario Czaja (CDU) vom 10. Dezember 2009 (Eingang beim Abgeordnetenhaus am 14. Dezember 2009) und Antwort Fortbestand der Grundwasserregulierungsanlage in Mahlsdorf-Kaulsdorf. Drucksache 16 / 13 936, Kleine Anfrage. [http://www.stiftung-naturschutz.de/fileadmin/img/pdf/Kleine\\_Anfragen/ka16-13936.pdf](http://www.stiftung-naturschutz.de/fileadmin/img/pdf/Kleine_Anfragen/ka16-13936.pdf), (Download am 05.06.2012).
- Abgeordnetenhaus Berlin (2012): Kleine Anfrage des Abgeordneten Michael Freiberg (CDU) vom 26. März 2012 (Eingang beim Abgeordnetenhaus am 27. März 2012) und Antwort Siedlungsverträgliche Grundwasserstände im Rudower Blumenviertel. Drucksache 17 / 10 368, Kleine Anfrage. [http://www.stiftung-naturschutz.de/fileadmin/img/pdf/Kleine\\_Anfragen/ka17-10368.pdf](http://www.stiftung-naturschutz.de/fileadmin/img/pdf/Kleine_Anfragen/ka17-10368.pdf), (Download am 05.06.2012).
- BSU (2012): Problematik hoher Grundwasserstände. Stand: 8.5.2012, <http://www.hamburg.de/hohe-gw-staende/> (Download am 04.06.2012)
- Classen, N. (2012): Grundwasserstand Hamburg. Präsentation, BSU.
- Euler C., Gerdes H. und Kämpf M. (2009): Sustainable Groundwater Management and Climate Change. Water And Waste 2009: 2-4.
- Faber, R., K. Leroch, H. P. Nachtnebel (2005): Flussraum Agenda – Risikoanalyse des bestehenden Hochwasserschutzes Stadt Gleisdorf und Umgebung, Arbeitspaket: Ist Zustand und Analyse, Wien. Online verfügbar unter: [http://iwhw.boku.ac.at/FABER/Endbericht/Endbericht\\_V26.pdf](http://iwhw.boku.ac.at/FABER/Endbericht/Endbericht_V26.pdf), (Download am 04.05.2012)
- Flughafen Hamburg GmbH (2011): 2011 Zahlen, Daten, Fakten. Juni 2011, Hamburg.
- Grimmer, S. (2006): Sackungsprozesse in natürlichen Lockergesteinsfolgen infolge Grundwasserwiederanstiegs.
- Grothmann, T.; Krömker, D.; Homburg, A.; Siebenhüner, B. (Hrsg.) (2009): KYOTOplus-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. Online verfügbar unter [http://www.erklim.uni-oldenburg.de/download/KyotoPlusNavigator\\_Downloadfassung\\_April2009\\_090419.pdf](http://www.erklim.uni-oldenburg.de/download/KyotoPlusNavigator_Downloadfassung_April2009_090419.pdf) (Download am 01.06.2011)
- Grundwasser-Online (2003): Berlin, Hamburg, Südbayern – Vernässungen durch hohes Grundwasser bundesweites Problem. Stand: 2.3.2012. Online verfügbar unter [http://www.grundwasser-online.de/gwo\\_portal/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=61](http://www.grundwasser-online.de/gwo_portal/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=61) (Download am 04.06.2012)
- HAMBURG WASSER, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer (2007): Wie schütze ich mein Haus vor Starkregenfolgen? Ein Leitfaden für Hauseigentümer, Bauherren und Planer. Hamburg. Online verfügbar unter: <http://www.hamburg.de/contentblob/135098/data/faltblatt-starkregenfolgen.pdf> – *wird derzeit überarbeitet*
- HEATCO (2006): Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Deliverable 5: Proposal for Harmonised Guidelines.
- Jones, M. (2012): Rising Groundwater in Central London. Online verfügbar unter [http://www.groundwateruk.org/rising\\_groundwater\\_in\\_central\\_london.aspx](http://www.groundwateruk.org/rising_groundwater_in_central_london.aspx), (Download am 04.06.2012).

- Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer (2008): Fallstudie Hamburg, Teil A: Analyse, F+E Vorhaben: Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS) im Rahmen des Förderprogramms des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RI-MAX), Aachen.
- Melzer, H. (2011): Steuer: Lompscher bricht geltendes Recht und lässt tausende Hausbesitzer absaufen. 28.01.2011, Online verfügbar unter <http://www.heikmelzer.de/index.php?ka=1&ska=1&idn=907>, (Download am 05.06.2012).
- Müller, M. (o. J.): Überschwemmungen in Deutschland - Ereignistypen und Schadenbilder. Deutsche Rückversicherung AG, Düsseldorf. Online verfügbar unter <http://www.schadenprisma.de/sp/SpEntw.nsf/3aa4f805e74f3cd5c12569a0004f2eac/c8bfa59692144cf1c1256d5100449676?OpenDocument>, (Download am 04.06.2012).
- Müller, M.; Thieken, A. (2005): Hochwasserschäden bei Unternehmen in Sachsen - Erfahrungen aus dem Auguthochwasser 2002. In: Schadensprisma. Heft 5, S. 22-31.
- Norddeutsches Klimabüro (2012): Norddeutscher Klimaatlas. Online verfügbar unter <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/> (Download am 06.06.2012)
- Statistikamt Nord (2011): Hamburger Stadtteil-Profile 2011. Band 11 der Reihe „NORD.regional“. Hamburg. (Download am 05.06.2012).

### **3 Fallstudie 2: Handlungsfeld Bauen – Grüne Dächer für Hamburg**

#### **3.1 Beschreibung der Maßnahme**

Bereits innerhalb der letzten Dekaden zeigen die Untersuchungen von Riecke und Rosenhagen (2009) eine Zunahme der durchschnittlichen Jahrestemperatur und der Anzahl der Sommertage in Hamburg. Das Norddeutsche Klimabüro (2012) sagt für die Periode 2071-2100 (im Vergleich zu 1961-1990) eine mittlere Zunahme der durchschnittlichen Jahrestemperatur um 2,1°C vorher. Weiterhin zeigen die Szenarien eine Zunahme der Anzahl der Sommertage beziehungsweise der heißen Tage mit Temperaturen von mindestens 25 beziehungsweise 30°C. Das mittlere Szenario zeigt 17,7 Tage mehr Sommer- beziehungsweise 6,1 Tage mehr heiße Tage in Hamburg. Zum Vergleich: Für die Periode 1981-1990 wurden 22 Sommertage pro Jahr erfasst (Daschkeit und Renken 2009). Ebenfalls wird eine wesentliche Zunahme der Zahl an tropischen Nächten (mit einem Temperaturminimum über 20°C) prognostiziert.

In Großstädten werden diese Auswirkungen des Klimawandels durch den Wärmeinseleffekt noch verstärkt, mit Konsequenzen für Gesundheit und Wohlbefinden. Der Wärmeinseleffekt wird durch versiegelte Flächen, zum Beispiel Straßen und Gebäude, hervorgerufen, welche die Sonneneinstrahlung absorbieren und als Hitze wieder abstrahlen. Dachbegrünungen bewirken eine Abmilderung des Wärmeinseleffekts in Großstädten und stellen damit eine für Hamburg relevante Anpassungsmaßnahme dar. Neben der Absorption von Sonnenenergie speichern grüne Dächer auch Niederschlagswasser, das sich über die Verdunstung wieder positiv auf die Luftfeuchtigkeit und die gefühlte Temperatur auswirkt. Daneben puffern Dachbegrünungen Niederschlagsspitzen ab. Sie können somit das Abwassersystem bei Extremereignissen entlasten (Banting et al. 2005, Brandt 2006, Amt für Umweltschutz Stuttgart 2010).

Die Möglichkeit für Dachbegrünung besteht auf vielen Dächern. Eine Begrünung ist auf Dächern bis zu einem Dachwinkel von 35 Grad möglich. Besonders gut geeignet sind Flachdächer. Eine Ausstattung mit grünen Dächern kann bei Neubauten erfolgen, aber auch im Bestand nachgerüstet werden. Die Wirkung der grünen Dächer stellt sich bereits kurzfristig nach der Installation ein, sobald die Pflanzen getrieben sind. Die klassische Flachdachkonstruktion stellen Kiesdächer dar, welche die geschilderten positiven Wirkungen von grünen Dächern nicht aufweisen.

Untersuchungen über die Wirkung von Gründächern zur Klimaanpassung in Städten wurden bisher nur sehr begrenzt durchgeführt. Tröltzsch et al. (2012) haben eine Fallstudie für die Stadt Düsseldorf durchgeführt. Weitere internationale Untersuchungen liegen aus Toronto (Banting et al. 2005) und New York (Rosenzweig et al. 2006) vor.

### 3.2 Kosten- und Nutzenbewertung

Für Gründächer sind bereits mehrere „klassische“ Kosten-Nutzen-Analysen durchgeführt worden. Hierunter sind einzelwirtschaftliche Analysen zu verstehen, die keinen Umweltnutzen mit einbeziehen. Im Mittelpunkt stehen meist extensive Dachbegrünungen, die bereits eine positive Wirkung für das Stadtklima erreichen. Mann (2005) schätzen die Baukosten von extensiven Begrünungen mit 12 Euro/m<sup>2</sup>. Im Vergleich zu einem Kiesdach mit 7 Euro/m<sup>2</sup> liegen diese also deutlich höher. Das gleiche trifft auf die jährlichen Wartungskosten zu, die bei grünen Dächern 0,50 Euro/m<sup>2</sup> betragen. Für Kiesdächer wird durchschnittlich mit 0,20 Euro/m<sup>2</sup> gerechnet. Aus verschiedenen US-amerikanischen Studien können Zusatzkosten für Gründächer im Vergleich zu konventionellen Dächern zwischen 8,57 bis 55 Euro/m<sup>2</sup> entnommen werden (siehe folgende Übersicht).

**Tabelle 1: Kosten für Gründächer aus verschiedenen Studien**

Studie	Installationskosten <sup>4</sup> (Mehrkosten zu konventionellem Dächern)	Jährliche Wartungskosten (Mehrkosten zu konventionellen Dächern)
	umgerechnet in €/m <sup>2</sup>	umgerechnet in €/m <sup>2</sup>
Mann 2005	5 - 14	0,30
Getter & Rowe 2006	Doppelt so hoch wie konventionell	k.A.
Acks 2006	8,57 – 214,44	-0,34 – 9,86
Clark et al. 2007	47,13	k. A.
Carter & Keeler 2007	54,83	0
City of Portland 2008	42,29	0,18

Quelle: in Anlehnung an Altvater et al. (2012).

Positive Effekte zeigen sich in einer längeren Lebensdauer der grünen Dächer. Im Vergleich zu konventionellen Dächern wird diese als doppelt so hoch eingeschätzt. Um die Wirtschaft-

<sup>4</sup> Umgerechnet aus Originalquellen.

lichkeit der grünen Dächer festzustellen, wurden bereits mehrere Kosten-Nutzen-Analysen durchgeführt. Die folgende Tabelle stellt einige Ergebnisse zusammen:

**Tabelle 2: Übersicht bisheriger Kosten-Nutzen-Analysen von Gründächern (Euro/m<sup>2</sup>)**

	Kostenvorteil über Betrachtungszeitraum	Kostenvorteil auf ein Jahr umgerechnet
HÄMMERLE (1995)	21,44 € / 36 Jahre	0,60 €
HÄMMERLE (2002)	25,00 € / 40 Jahre	0,60 €
MANSCHKEK (1997)	16,50 € / 30 Jahre	0,55 €
KOLB (1997) <i>extensiv</i>	6,20 € / 40 Jahre	0,16 €
KOLB (1997) <i>intensiv</i>	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 (2005).

Es zeigt sich, dass Gründächer heute aus privatwirtschaftlicher Betrachtung wirtschaftlich sind, auch ohne die Auswirkungen auf das Stadtklima zu berücksichtigen. Trotz dieser Ergebnisse zögern viele Hausbesitzer und Bauherren grüne Dächer zu installieren. Oftmals werden bei der Betrachtung längerfristige Kostenersparnisse nicht berücksichtigt. Weiterhin schrecken Gründe der Optik ab oder es wird mit einer eingeschränkten Funktionalität gerechnet. Viele Kommunen arbeiten daher mit Finanzierungs- und Anreizinstrumenten, um den Anteil von grünen Dächern zu erhöhen beziehungsweise deren Nutzung verpflichtend zu machen (vgl. Ansel 2008).

### **3.2.1 Kostenschätzung**

Im Rahmen der Kostenschätzung für die Stadt Hamburg sollen die Kosten für die Hausbesitzer oder Bauherren in die Berechnung eingehen.

Nach Rücksprache mit der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) der Stadt Hamburg musste leider festgestellt werden, dass weder zum derzeitigen Anteil an Gründächern in Hamburg noch zur Fläche der geeigneten Dachflächen Daten vorliegen. Wir nutzen deshalb für die Berechnung Daten aus anderen Städten, zum Beispiel Berlin, und passen diese auf Hamburg an. Bei den Berechnungen ist somit zu beachten, dass weitreichende Annahmen in die Schätzung eingehen.

Für verschiedene Städte liegen Abschätzungen vor, welcher Anteil der Gebäudefläche für grüne Dächer geeignet ist. Bei anderen Untersuchungen, zum Beispiel Altvater et al. (2012), wird von einem durchschnittlichen Anteil an geeigneten Flächen für grüne Dächer von 20 % an der Stadtfläche ausgegangen.

**Tabelle 3: Anteil von für grüne Dächer geeigneten Gebäudeflächen**

Studie	Betrachtete Städte	Anteil der für grüne Dächer geeigneten Fläche, (% zu städtischer Gesamtfläche)
Banting et al. 2005	Toronto	37 %
Clark et al. 2007	US-amerikanische Städte	20 %
Klostermann & Fink 2007	Berlin	25 %

Wir gehen hier anhand der Verfahrensweise für Berlin vor, welche nach Klostermann & Fink (2007) auf Hamburg übertragbar ist. Danach sind 37 % der Flächen in Hamburg Gebäudeflächen. Für Berlin wurde angenommen, dass 50 % der Gebäudefläche für extensive Dachbegrünung geeignet ist. Allerdings wurde angemerkt, dass Hamburg einen höheren Anteil an Steildächern aufweist, so dass wir für die weitere Berechnung annehmen, dass konservativ geschätzt mindestens 15 % der städtischen Fläche für grüne Dächer geeignet ist. Der derzeitige Anteil an Gründächern ist vermutlich vernachlässigbar. Im Vergleich dazu hat die Stadt Düsseldorf ihren Anteil an Gründächern in den letzten Jahren, unter anderem mit verschiedenen Förderinstrumenten, auf 1,6 % der Gesamtfläche ausgebaut (Holzmüller 2009). Da anzunehmen ist, dass der Anteil der Gründächer in Hamburg wesentlich darunter liegt, wird hier von einem möglichen Ausbau der grünen Dächer um 15 % ausgegangen. Dies entspricht 113,3 km<sup>2</sup> (Gesamtfläche: 755,3 km<sup>2</sup>, Quelle: Statistikamt Nord 2012).

Als Alternativansatz kann das Gründachpotential parallel zu den Annahmen über mögliche Flächen für Photovoltaikanlagen geschätzt werden. Ingenieure gehen für deutsche Städte und urbane Räume von 30-50 m<sup>2</sup> Dachfläche pro Einwohner aus, die als für Photovoltaik geeignet gilt (Altvater et al. 2012). Dies würde für Hamburg bei 1.786.448 Einwohnern (Stand Ende 2010, Statistikamt Nord 2012) eine Gesamtdachfläche von zwischen 53,6 km<sup>2</sup> und 89,3 km<sup>2</sup> ergeben. In die Berechnung der möglichen Dachfläche für Photovoltaikanlagen gehen neben der Neigung des Daches auch weitere limitierende Parameter, wie Verschattung ein, die für Gründächer nicht relevant sind. Wir nehmen somit 53,6 km<sup>2</sup> als niedrigsten

Wert an und 113,3 km<sup>2</sup> als Höchstwert für potenzielle Gründächer, der nur erreicht wird, wenn alle Dächer für die es technisch möglich ist, mit einer Dachbegrünung ausgestattet werden.

Als Kostengröße wird die oben dargestellte Bandbreite von Mann (2005) für extensive Dachbegrünung genutzt: 5-14 Euro/m<sup>2</sup>. Diese stellt die Differenz zu einem konventionellen Kiesdach dar. Der Wert soll hier als Grundlage verwendet werden, auch wenn Kiesdächer nur als Flachdächer eingesetzt werden. Die Installation findet innerhalb der ersten 20 Jahre verteilt statt, immer wenn der Modernisierungsbedarf im Gebäudebestand besteht. Es wird angenommen, dass sich dieser gleichmäßig über die 20 Jahre verteilt.

Um die längere Lebensdauer der grünen Dächer einzubeziehen, werden für die Periode zwischen 20 und 40 Jahren Lebenszeit (beziehungsweise zwischen 60 und 80 Jahren ab heute) die Kosten für die Erneuerung des Kiesdachs von 7 Euro/m<sup>2</sup> (Mann 2005) abgezogen.

Gegenüber Kiesdächern treten höhere Wartungskosten in Höhe von 0,30 Euro/m<sup>2</sup> pro Jahr auf (Mann 2005), welche ebenfalls als Kostenkomponente angerechnet werden. In den ersten 10 Jahren nur für den bereits installierten Bestand.

Um die zeitliche Differenz zwischen der Installation der Gründächer und dem Erreichen ihres Nutzens Ende des 21. Jahrhunderts in die Berechnung einzubeziehen, werden die Nutzen- und Kostenkomponenten mit einem Diskontsatz von 3 % auf 2012 diskontiert (siehe UBA-Methodenkonvention, Umweltbundesamt 2007).

Daraus ergeben sich zusätzliche Kosten (Installations- und Wartungskosten) für die angenommenen 53,6 bis 113,3 km<sup>2</sup> Gründächer zwischen 44 und 1.990 Mio. Euro (für den Zeitraum 2012-2100, diskontiert auf 2012).

Um die Akzeptanz für grüne Dächer zu erhöhen, könnte die Maßnahme mit Anreiz- und Förderinstrumenten unterstützt werden. Anreizinstrument könnte eine gesplittete Abwassergebühr sein, welche die Dämpfung von Niederschlagsereignissen und entsprechende Entlastung der Abwasserentsorgung zum Ziel hat. Weiterhin könnten planerische Vorgaben zur Anwendung kommen, zum Beispiel Vorgaben für gesamte Baugebiete. Finanzierungsinstrumente setzen bereits mehrere deutsche Städte ein, zum Beispiel Düsseldorf. Gemäß Angaben der Stadt Düsseldorf wurden im Zeitraum 2000-2009 etwa 90.000 m<sup>2</sup> Gründach mit einem Volumen von 1,4 Mio. Euro gefördert (vgl. Mersmann 2010). Dies entspricht einer

durchschnittlichen Förderung von 15 Euro/m<sup>2</sup>. Gemäß Ansel (2008) liegt die Förderung in deutschen Städten pro m<sup>2</sup> in einer Bandbreite zwischen 10 und 20 Euro.

### **3.2.2 Bewertung der Nutzen**

Folgende zwei Nutzenkomponenten werden in die Fallstudie einbezogen:

- Wirkung der grünen Dächer auf das Stadtklima und Konsequenzen für die Gesundheit sowie
- positive Auswirkungen auf Stromgewinnung aus Solaranlagen auf Dächern.

### **Vermiedene hitzebedingte Sterbefälle**

Die Maßnahme wirkt sich in Großstädten positiv auf das Stadtklima aus und damit dem Hitzeeinseleffekt entgegen. Es werden die Wirkungen der grünen Dächer auf das Mikroklima der städtischen Gebiete und somit auf die Gesundheit der Einwohner betrachtet. Für die Monetarisierung der Gesundheitskosten liegen bisher keine Werte pro Grad Celsius oder pro Hitzetag vor. Es wird deshalb als grobe Annäherung davon ausgegangen, dass die Gründächer dazu beitragen, dass der Klimawandel im Betrachtungsraum nicht als extreme Wärmebelastung, sondern nur als starke Wärmebelastung wahrgenommen wird (Tröltzsch et al. 2012, in Anlehnung an Koppe und Jendritzky 2004 und Hübler und Klepper 2007). Diese Unterscheidung wurde von Koppe und Jendritzky (2004) getroffen, welche die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Mortalität in Baden-Württemberg analysieren, und wurde auch von Hübler und Klepper (2007) als Basis für die Hochrechnung auf Deutschland verwendet. Als Parameter verwenden Koppe und Jendritzky (2004) den Anstieg der Mortalität für verschiedene Temperaturen, wobei der minimale Extremwert auf einer linearen Fortschreibung basiert und der maximale extreme Wert auf einer exponentiellen Fortschreibung beruht.

**Tabelle 4: Sterbefälle pro 1000 EW, die durch grüne Dächer verhindert werden könnten**

	Anstieg der Mortalität in %	Sterbefälle je 1000 EW
Status quo		9,5
Sterbefälle bei starker Wärmebelastung	9,3	10,4
Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (min)	12	10,6
Sterbefälle bei extremer Wärmebelastung (max)	14,8	10,9

Quelle: Eigene Berechnungen.

Im Jahr 2010 starben in Hamburg 9,5 je 1.000 Einwohner (Statistikamt Nord 2012). Durch die Vermeidung einer extremen Wärmebelastung könnten Gründächer gemäß Tabelle 4 zwischen 0,2 und 0,5 Sterbefälle pro 1.000 Einwohner vermeiden.

Da für die Anzahl der Einwohner, die von Gründächern in der Stadt profitieren, sehr wenige Informationen vorliegen, wird hier die relativ breite Annahme aus Tröltzsch et al. (2012) verwendet, dass sich die Gründächer, wie bei den Kosten angenommen in Höhe von 53,6 bis 113,3 km<sup>2</sup>, positiv auf 5 bis 30 % der Einwohner auswirken.

**Tabelle 5: Nutzen durch vermiedene Sterbefälle (im Jahr 2100)**

	30% der EW profitieren	15% der EW profitieren	5% der EW profitieren
Vermiedene Sterbefälle durch grüne Dächer (min) (2100)	137	69	23
Vermiedene Sterbefälle durch grüne Dächer (max) (2100)	280	140	47
<b>Quantifizierung bei Verlust von 8 Lebensjahren (min) in Mio. €/Jahr (2100)</b>	<b>65</b>	<b>32</b>	<b>11</b>
<b>Quantifizierung bei Verlust von 8 Lebensjahren (max) in Mio. €/Jahr (2100)</b>	<b>132</b>	<b>66</b>	<b>22</b>

Quelle: Eigene Berechnungen.

Für die Monetarisierung wird das „value of life year“-Konzept (VOLY) verwendet, das verlorene Lebensjahre mit Geldwerten bemisst. Im Vergleich zum „Value of statistical life“-Konzept (VSL), welches standardmäßig von einem Verlust von 40 Lebensjahren ausgeht (vgl. Ciscar 2009), ist der VOLY-Ansatz besser geeignet, da hitzebedingte Todesfälle besonders bei Menschen über 75 Jahren zu erwarten sind. In Anlehnung an das PESETA-Forschungsprojekt (Ciscar 2009) wird ein durchschnittlicher Verlust an Lebensdauer von acht Jahren angenommen. Aufbauend auf Ergebnissen des NEWEXT-Forschungsvorhabens gehen wir von einem VOLY von 59.000 Euro pro verlorenem Lebensjahr aus (vgl. Markandya et al. 2004).

Der Nutzen der vermiedenen Sterbefälle liegt für die Jahre 2071-2100 zwischen 11 und 22 Mio. Euro/Jahr bei der geringeren Fläche an Gründächern. Für die maximal mögliche Fläche an Gründächern ist mit 65 bis 132 Mio. Euro/Jahr am Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen.

### **Vermiedene hitzebedingte Krankenhauskosten**

Darüber hinaus lassen sich durch Gründächer vermiedene hitzebedingte Krankenhauskosten einbeziehen. Ein bottom-up Ansatz ist hier aufgrund der Datenlage nicht möglich, deshalb sollen anhand der Studie von Hübler und Klepper (2007) deutschlandweite Berechnungen auf Hamburg heruntergebrochen werden.

Hübler und Klepper (2007) prognostizieren auf Basis der Hitzewelle von 2003, dass durch den Klimawandel bundesweit und pro Jahr ca. 150.000 Krankheitsfälle zu beobachten wären, die insbesondere in extremen Hitzesituationen entstehen. In diese Berechnung sind auch die Veränderung der Altersstruktur in Deutschland und bereits heute auftretende Hitzeereignisse einbezogen. Die „reinen“ Auswirkungen von zusätzlichen Hitzetagen machen 67.200 Krankheitsfälle aus. Tröltzsch et al. (2012) leiten aus den Daten von Hübler und Klepper (2007) für die Regionen mit durchschnittlich 20 zusätzlichen Hitzetagen 1,8 zusätzliche Krankenhauseinweisungen pro 1.000 Einwohner ab.

Das Norddeutsche Klimabüro (2012) gibt für Hamburg in der Periode 2071-2100 im mittleren Szenario 5,1 zusätzliche heiße Tage pro Jahr an. Im Verhältnis zu 20 zusätzlichen Hitzetagen ergeben sich 0,5 zusätzliche Krankenhauseinweisungen pro 1.000 Einwohner. Umgerechnet auf die Bevölkerung in Hamburg (1.786.448, im Jahr 2010, Statistikamt Nord 2012) entspräche dies 893 zusätzlichen Krankenhausaufenthalten. Da für die Behandlungskosten von hitzebedingten Krankheiten keine spezifischen Angaben vorliegen, verwenden Hübler und Klepper (2007) für die Monetarisierung die durchschnittlichen Krankenhauskosten in Deutschland. Die Angabe von 3.330 Euro pro Einweisung wird hier analog verwendet. Da nur ein Teil der Einweisungen vermieden werden kann, wird hier angenommen, dass parallel zu den profitierenden Einwohnern im vorherigen Kapitel ein Sechstel bis maximal 30 % der Einweisungen vermieden werden kann.

**Tabelle 6: Vermiedene Krankenhauskosten (im Jahr 2100)**

	Hamburg (im Jahr 2100)
Betroffene Einwohner	1.786.448
Zusätzliche Krankenhaus-Einweisungen pro 1.000 EW (pro Jahr)	0,5
Zusätzliche Krankenhaus-Einweisungen (pro Jahr)	893
Zusätzliche Kosten Gesundheitssystem (in Mio. Euro/Jahr)	2,95
Anteil von grünen Dächern vermieden (in Mio. Euro/Jahr)	0,5 bis 1

Quelle: Eigene Berechnungen.

### ***Positive Effekte auf die Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen***

Als weitere Nutzenkomponente werden die Synergie-Effekte von Gründächern mit der Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen betrachtet. Der positive Effekt von einer höheren Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien besteht in den eingesparten Treibhausgasreduktionen bei der Erzeugung durch andere kohlenstoffbasierte Energieträger.

Klostermann und Fink (2007) skizzieren positive Effekte bei der Kopplung von Solaranlagen und Gründächern. Bei Temperaturen über 25°C nimmt die Leistung der Photovoltaikmodule bei jedem Grad um 0,5 % ab. An heißen Tagen sind Temperaturen von 80°C auf Flachdächern nicht unüblich, bei harten Baustoffen können diese bis zu 50°C erreichen. Begrünte Flächen erwärmen sich nur um 2-3°C gegenüber der Lufttemperatur, somit treten Temperaturunterschiede von bis zu 40°C bei begrünten und unbegrünten Flächen auf (ZinCo GmbH 2012). Im Projekt Solarpotenzialanalyse II (in Auftrag gegeben durch BSU, Stadt Hamburg) wurde berechnet, dass sich mit Photovoltaikanlagen in Hamburg bis zu 2.500 GWh jährlich realisieren lassen (simuSOLAR 2012). Wir nehmen auf Basis der Informationen des Norddeutschen Klimabüros (2012) an, dass Sommertage in Hamburg im Mittel um 17,7 Tage pro Jahr und heiße Tage im Mittel um 6,1 Tage zunehmen. An Sommertagen steigt die Temperatur über 25 °C, an heißen Tagen übersteigt sie 30°C.

Konservativ gerechnet nehmen wir an, dass an Sommertagen Gründächer die Temperaturen für aufgebaute Photovoltaikanlagen gegenüber nicht begrünten Dächern um 10°C und an heißen Tagen um 20°C reduzieren können. Weiterhin rechnen wir für die aufgebauten Photovoltaikanlagen mit zwei Szenarien zum Ausbau der Solarenergie: 25 % der möglichen Leistung (1.250 GWh/Jahr) und 10 % der möglichen Leistung (250 GWh/Jahr).

Wie in der Solarpotenzialanalyse II rechnen wir mit einem Emissionsfaktor von 520 t CO<sub>2</sub>/GWh, der auftritt, wenn der Strom mit fossilen Energieträgern erzeugt wird (vgl. simuSOLAR 2012).

Für die Monetarisierung der Treibhausgasemissionen berechnen wir die mögliche volkswirtschaftliche Ersparnis durch die Vermeidung des Kaufs von Emissionszertifikaten. Für Daten zum erwarteten Preis für Emissionszertifikate wird auf Schätzungen der Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2008) zurückgegriffen. Diese rechnen mittelfristig (ab 2020) mit einem Preis von 30 Euro/t CO<sub>2</sub>. Laut aktuellen Prognosen werden für die nächsten Jahre geringere Werte erwartet, zum Beispiel ZEW (2012) 15 bis 17 €/t CO<sub>2</sub> bis 2020. Aufgrund der aktuellen Klimaschutzziele wird aber mit ansteigenden Preisen gerechnet. Da unser Betrach-

tungszeitraum langfristig ist, werden die Zahlen der Europäischen Kommission eingesetzt. Zu bemerken ist aber, dass die Unsicherheiten bei einem Betrachtungszeitraum bis 2100, wie er hier angelegt ist, für diese Größe sehr relevant sind.

**Tabelle 7: Nicht benötigte Emissionszertifikate durch grüne Dächer in Hamburg**

	25%-Szenario (Ausbau der Photo- voltaik)	10%-Szenario
Jahresleistung (in GWh)	1.250	250
Leistung pro Tag (in GWh/Tag)	5,14	1,03
Kompensierbare Leistungseinbußen an heißen Tagen (in GWh pro Jahr)	1,57	0,31
Kompensierbare Leistungseinbußen an Sommertagen (in GWh pro Jahr)	5,96	1,19
Summe der kompensierbaren Leistungseinbußen (in GWh pro Jahr)	7,53	1,51
Ersparte Treibhausgasemissionen durch kompensierba- re Leistungseinbußen (in t CO <sub>2</sub> )	3913,36	782,67
<b>Nicht benötigte Emissionszertifikate (in Euro/Jahr)</b>	<b>117.400,68</b>	<b>23.480,14</b>

Quelle: Eigene Berechnungen.

Wie die Kostenkomponenten werden die verschiedenen Nutzenbestandteile auf 2012 diskontiert. Für die Sterbefälle wird mit dem Erreichen des berechneten Wertes von 11 bis 132 Mio. Euro pro Jahr für die Periode 2071-2100 gerechnet. Vorher nehmen wir an, dass zwischen 2041-2070 zwei Drittel der Nutzen anfallen, für 2012-2040 ein Drittel. Die gleiche zeitliche Verteilung wird für die Krankenhauskosten genutzt. Die nicht benötigten Emissionszertifikate steigern sich in den 20 Jahren parallel zum Aufbau der Gründächer und dem Ausbau von Photovoltaikanlagen. Ab 2032 fallen diese jährlich in der oben berechneten Höhe von 23.000 bis 117.000 Euro pro Jahr an.

Die Summe der Nutzenkomponenten zeigen einen Gesamtnutzen zwischen 183 und 2.108 Mio. Euro für 53,6 bis 113,3 km<sup>2</sup> begrünte Dächer (bis 2100, diskontiert auf 2012).

**Tabelle 8: Übersicht der verschiedenen Nutzenkomponenten**

<b>Nutzenkomponente</b>	<b>Nutzen (in Mio. €, bis 2100, diskontiert auf 2012)</b>
Vermiedene Sterbefälle	174 - 2.089
Vermiedene Krankenhauskosten	7,9 - 15,8
Nicht benötigte Emissionszertifikate	0,54 - 2,71
<b>Gesamt</b>	<b>183 - 2.108</b>

Quelle: Eigene Berechnungen.

### **3.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen**

Die berechneten Kosten betragen zwischen 44 und 1.990 Euro für den Zeitraum bis 2100 (diskontiert auf 2012) und bestehen zu einem großen Teil aus den zusätzlichen Wartungskosten. Die Kosten fallen bei den Hausbesitzern an. Gegebenenfalls ergeben sich hier zusätzlich geringe Kosten für öffentliche Anreizinstrumente oder Informationskampagnen zur Steigerung der Akzeptanz und der Bekanntheit von grünen Dächern.

Durch 53,6 bis 113,3 km<sup>2</sup> begrünte Dächer würde nach unseren Berechnungen ein Gesamtnutzen zwischen 183 und 2.108 Mio. Euro (bis 2100, diskontiert auf 2012) eintreten. Hierbei gehen vermiedene Sterbefälle durch klimawandelbedingte zusätzliche Hitzetage, vermiedene Krankenhauskosten an zusätzlichen Sommer- und Hitzetagen und nicht benötigte CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate durch eine bessere Effizienz von Photovoltaikanlagen ein.

Die mittleren Nutzenkomponenten liegen in ähnlicher Höhe wie die mittleren Kosten. Es können allerdings auch Szenarien auftreten, bei denen dies nicht gegeben ist. Dieses Verhältnis steigt, je höher der Anteil der profitierenden Einwohner gewählt wird. Neben den profitierenden Einwohnern hängen die Nutzen vor allem von den eintretenden Klimaveränderungen ab, d.h. wie viele zusätzliche Sommer- und heiße Tage in Hamburg 2050 beziehungsweise 2100 auftreten werden. Die Kosten variieren vor allem anhand der Kostenspanne für die Installation von grünen Dächern und der Kosten für die konventionellen Dächer, welche durch grüne Dächer ersetzt werden. Kiesdächer sind eine relativ preiswerte Dachvariante, die nur für Flachdächer in Frage kommt.

Darüber hinaus treten weitere Nutzenaspekte auf, die ein Nutzen-Kosten-Verhältnis weiter verbessern würden. Zu nennen sind die vermiedenen Produktivitätseinbußen, ein durch die Retentionswirkung der Dächer verbessertes Regenwassermanagement, Wärmedämmung im

Winter und, bei der Kopplung mit Solaranlagen, ein Windschutz für die Bepflanzung der Gründächer.

Der Berechnung liegen aber auch verschiedene Unsicherheiten zugrunde:

- Insbesondere konnte die geeignete Dachfläche in Hamburg nur grob geschätzt werden.
- Die Auswirkungen auf das Stadtklima liegen nur in unmittelbarer Umgebung der grünen Dächer vor und sind sehr kleinräumig. Bei langen Trockenperioden, in welchen Gründächer kein Wasser mehr speichern, wirkt sich die Maßnahme fast nicht mehr auf das Stadtklima aus.
- Während die Kosten für die öffentlichen oder privaten Hausbesitzer anfallen, liegen die Nutzen vor allem auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Der positive externe Effekt von Gründächern müsste somit durch Anreizinstrumente internalisiert werden.

### **3.3 Bewertung der Maßnahme**

Grüne Dächer haben diverse positive Auswirkungen auf das Stadtklima und damit die Gesundheit und die Lebensqualität der Bevölkerung. Sie sparen Energie und wirken sich förderlich auf die Abwasserentsorgung aus. Diese positiven Wirkungen gehen nur zum Teil in unsere Berechnungen ein. Die Nutzen und Kosten variieren sehr stark und sind im mittleren Fall ausgeglichen. Negative Auswirkungen sind derzeit nicht bekannt. Grüne Dächer sind eine No-Regret Maßnahme, da sie bereits unter heutigen Klimabedingungen positive Wirkungen zeigen. Die Umsetzung der Maßnahme ist für die Einzelanlage kurzfristig möglich. Die Wirkung entwickelt sich direkt nach der Installation.

Neben Informationsmaßnahmen zur Verbreitung von grünen Dächern sind planerische Vorgaben möglich, so dass bereits bei einer Sanierung oder dem Neubau von Gebäuden grüne Dächer eingerichtet werden können. In Hamburg werden gerade gesplittete Abwassergebühren eingeführt, bei denen Gründächer ebenfalls angerechnet werden. Für diese werden nur 50 % der Fläche berechnet (Hamburg Wasser 2012).

### 3.4 Fallstudienliteratur

- Altwater, S.; Bouwma, I.; de Block, D.; Dworak, T.; Frelüh-Larsen, A.; Görlach, B.; Hermeling, C.; Klostermann, J.; König, M.; Leitner, M.; Marinova, N.; McCallum, S.; Naumann, S.; Osberghaus, D.; Prutsch, A.; Reif, C.; van de Sandt, K.; Swart, R.; Tröltzsch, J. (2012): Adaptation Measures in the EU: Policies, Costs, and Economic Assessment. Im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Klima.  
[http://ecologic.eu/files/attachments/Publications/2012/altwater\\_12\\_climate\\_proofing\\_report\\_2.pdf](http://ecologic.eu/files/attachments/Publications/2012/altwater_12_climate_proofing_report_2.pdf), (Download am 25.05.2012).
- Amt für Umweltschutz Stuttgart (2010): Der Klimawandel – Herausforderung für die Stadtklimatologie. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 3/2010.
- Ansel, W. (2008): Gründach-Förderung in Deutschland - Bewährte Verfahren und aktuelle Trends, in: Kommunalwirtschaft, 07-08/2008, S. 495-496.
- 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.
- Brandt, K. (2007): Die ökonomische Bewertung des Stadtklimas am Beispiel der Stadt Essen, Essener Ökologische Schriften, Band 25 (2007), Westarp-Wissenschaften.
- 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, Online verfügbar unter <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=2879>, (Download am 03.02.2011).
- Clark, C., Adriaens, P., Talbot, F.B. (2007): Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits, University of Michigan, Online verfügbar unter [http://www.erb.umich.edu/News-and-Events/colloquium\\_papers/Clarketal.pdf](http://www.erb.umich.edu/News-and-Events/colloquium_papers/Clarketal.pdf), (Download am 10.04.2012).
- Daschkeit, A.; Renken, A. L. (2009): Klimaänderung und Klimafolgen in Hamburg. Fachlicher Orientierungsrahmen. im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg. Dessau.
- Hamburg Wasser (2012): Gebührensplittung: Abminderung der anrechenbaren Flächen. Online verfügbar unter <http://www.hamburgwasser.de/gebuehrensplittung-1.html>, (Download am 31.05.2012).
- Hübler, M.; Klepper, G. (2007): Kosten des Klimawandels: Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/2kosten-des-klimawandels-die-wirkung-steigender-temperaturen-auf-gesundheit-und-leistungsfahigkeit>, (Download am 05.02.2011).
- Klostermann, N.; Fink, J. (2007): Implementierungsstrategie für Dachbegrünung in Hamburg. Dachbrünung als Bestandteil nachhaltiger Stadtentwicklung und dezentraler Regenwasserbewirtschaftung. HafenCity Universität.
- 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.
- Mann, G. (2005): Ansätze zu objektbezogenen Kosten-Nutzen-Analysen. Fachvereinigung Bauwerksbegrünung.
- Markandya, A. et al. (2004): New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies. NewExt Forschungsvorhaben. Im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Forschung.
- 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.

- Norddeutsches Klimabüro (2012): Norddeutscher Klimaatlas. Online verfügbar unter <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>, (Download am 11.05.2012).
- Riecke, W.; Rosenhagen, G. (2009): Das Klima von Hamburg. Bericht des Deutschen Wetterdienst.
- 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.
- Statistikamt Nord (2012): Statistisches Jahrbuch Hamburg 2011/2012. Hamburg.
- sumiSOLAR (2012): Solaratlas für Hamburg veröffentlicht. Online verfügbar unter <http://www.simusolar.de/news.php>, (Download am 14.05.2012).
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau.
- Umweltbundesamt (2007): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Dessau.
- ZEW (2012): KfW/ZEW CO2-Barometer. Online verfügbar unter <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/co2panel/de/CO2Barometer012012.pdf>, (Download am 31.05.2012).
- ZinCo GmbH (2012): Planungshilfe Solarenergie und Dachbegrünung. Online verfügbar unter [http://www.zinco.de/downloads/planungshilfen\\_pdfs/Solarenergie\\_Dachbegruenung.pdf](http://www.zinco.de/downloads/planungshilfen_pdfs/Solarenergie_Dachbegruenung.pdf), (Download am 14.05.2012).

## **4 Fallstudie 3: Handlungsfeld Landwirtschaft – Angepasste Sortenwahl**

### **4.1 Beschreibung der Maßnahme**

Die Land- und Forstwirtschaft und Fischerei haben nur einen Anteil von unter 1 % an der Bruttowertschöpfung in Deutschland. Gleichzeitig ist Deutschland einer der größten europäischen Agrarproduzenten: die Agrarexporte haben sich zwischen 1990 und 2008 mehr als verdoppelt. Mehr als die Hälfte der Landesfläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt (17 Mio. ha) (Kowalewski und Schulze 2010, Destatis 2012a).

Ähnlich stellt sich die Situation in der Metropolregion Hamburg dar, in der 1,08 Mio. ha und damit 55 % der Fläche landwirtschaftlicher Nutzung unterliegen. In der Stadt Hamburg sind 14.334 ha landwirtschaftlich genutzte Flächen und umfassen damit fast ein Fünftel der städtischen Flächen (Statistikamt Nord 2012). Obwohl der Anteil an der Bruttowertschöpfung der Stadt Hamburg nur 0,2 % darstellt, ist der Standort für verschiedene Anbausorten von besonderer überregionaler Bedeutung (Kowalewski und Schulze 2010). Vor allem das Anbaugebiet Niederelbe („Altes Land“) ist bekannt für Obstanbau, besonders bedeutend sind hierbei Äpfel. Das Gebiet umfasst das Elbufer in Niedersachsen und Hamburg. Im „Alten Land“ befindet sich ein Viertel der gesamten Apfelanbauflächen Deutschlands. Auf die Stadt Hamburg entfallen 1.006 ha (Statistikamt Nord 2012). Auf den Flächen in Niedersachsen und Hamburg wurden 2010 mehr als 30 % der deutschen Apfelernte erzeugt. Auf das flächenmäßig sehr kleine Hamburg entfallen dabei 4 % des deutschen Apfelanbaus (Destatis 2012b).

Die Landwirtschaft ist durch die Folgen des Klimawandels mit diversen Herausforderungen konfrontiert. Für die Metropolregion Hamburg zeigen die Szenarien im Mittel eine Zunahme der Regenmenge um 5 % für die Jahre 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990, wobei diese Zunahme mit einer Verschiebung der Niederschlagsmengen aus dem Sommer in den Winter beziehungsweise in geringerem Ausmaß in den Frühling und Herbst einhergeht. Bis zu 22 % könnte die Niederschlagsmenge im Winter im Mittel ansteigen, dagegen wird im Sommer mit einer mittleren Abnahme um 18 % gerechnet. Daraus gehen zwei Konsequenzen hervor: eine steigende Trockenheit im Sommer sowie starke Niederschläge und dadurch verursachte Überflutungen vor allem im Winter. Die Trockenheit im Sommer wird noch verstärkt durch eine Zunahme an Sommertagen - im mittleren Szenario für Hamburg um ca. 14 Tage pro Jahr - und heißen Tagen, welche die Problematik der geringen Niederschläge für die Landwirtschaft noch verschärfen. Weiterhin ist mit einer Zunahme von Stürmen vor allem im

Winter zu rechnen. Dabei soll sowohl die Sturmintensität als auch die Anzahl der Sturmergebnisse zunehmen (Norddeutsches Klimabüro 2012).

Landwirtschaft gilt als ein Sektor, der direkt von Klimaauswirkungen betroffen sein wird. Besonders der Pflanzenanbau ist direkt abhängig von Niederschlägen, Temperaturen aber auch Sturm- und Hagelereignissen. Das Klima beeinflusst Ernteerträge in ihrer Quantität und Qualität (Schaller und Weigel 2007, Döll und Schulze 2010). Temperaturerhöhungen können in einem gewissen Rahmen zu höheren Erträgen führen, wenn Sonneneinstrahlung bisher ein limitierender Faktor war. Bei einem sehr starken Anstieg über das Optimum der Photosyntheseleistung hinaus kommt es allerdings zu Schäden des Enzymsystems und zu einer Drosselung der Photosynthese und damit auch zurückgehenden Erträgen. Höhere Temperaturen können auch längere Vegetationsperioden auslösen. Der Blühbeginn kann bei Obstsorten zeitiger einsetzen (vgl. Chmielewski 2011). Nach Chmielewski (2007) hat sich in den letzten 35 Jahren der Blühbeginn von Apfelbäumen um 12 Tage nach vorn geschoben. Die verlängerte Vegetationsperiode kann sich im Obstanbau positiv auf die Erträge auswirken. Allerdings besteht auch eine höhere Gefahr von Spätfrostschäden, verursacht durch Spätfröste während der Blütezeit. Frostschäden können weitestgehend durch Frostschutzberegnung vermieden werden. Das System wird an der Niederelbe bereits eingesetzt.

Höhere Temperaturen begünstigen ebenfalls die Verbreitung von Schädlingen und erhöhen den Krankheitsbefall. Beobachtet wurde zum Beispiel in wärmeren Regionen eine stärkere Verbreitung des Apfelwicklers, dessen Generationsfolge sich erhöht, so dass verursachte Schäden zunehmen. An der Niederelbe wird zum Beispiel mit einer weiteren, dritten Generation des Apfelwicklers gerechnet, wie sie zurzeit schon am Bodensee auftritt (Chmielewski et al. 2009a; Weber und Görgens 2009).

Die Folgen von veränderten Niederschlagsmengen liegen für Trockenheit in einem Rückgang der Erträge, da eine intensivere Verdunstung und ein geringeres Wasserdargebot vorliegen. Während starker Trockenperioden und zusätzlich begünstigt durch Wind und Starkniederschläge steigt auch die Gefährdung von Bodenerosion und damit sinkt die Bodenfruchtbarkeit. Stärkere Niederschläge im Winter können zu einem Auffüllen der Bodenwasservorräte führen, aber vor allem bei hoher Intensität auch Nährstoffauswaschungen und Staunässe erzeugen (u. a. durch Überflutungen), so dass eine Beeinträchtigung der Pflanzen stattfindet (Chmielewski et al. 2009b).

Nach de Groot (2006) sind von der Sommertrockenheit besonders Sommergemüse, Salat, Obst (inkl. Baumobst) und Blumen betroffen. 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 tief wurzelnde und hitzeresistente Sorten im Vordergrund, die bei anhaltenden Trockenperioden ohne zusätzliche Bewässerung auskommen. Weiterhin sind Sorten zu bevorzugen, die auch mit Staunässe im Winter und Frühjahr aufgrund von Niederschlagsereignissen und deren Folgen zurechtkommen. Ein weiteres Problem ist Sonnenbrand, welcher durch die Sortenwahl mit dichterem Laub und damit Verschattung partiell reduziert werden kann. Durch robustere Sorten könnten sich ebenfalls Schäden aufgrund von Schädlingsbefall verringern. Der Anbau von resilienten Pflanzensorten stellt eine zentrale Anpassungsmaßnahme in der Landwirtschaft dar (vgl. van Ierland 2007).

Da der Apfelanbau in Hamburg eine herausragende landwirtschaftliche Bedeutung hat, soll sich die Fallstudie auf diese Sorte beziehen. Die Landwirte in Hamburg haben bereits heute mit Vernässungstendenzen und Phasen mit starker Trockenheit zu tun und überlegen, robustere Sorten einzusetzen. Betrachtet werden dafür vor allem ältere, zur Zeit nicht mehr genutzte Sorten, die einen Teil der erwünschten Eigenschaften besitzen, da sie zum Beispiel tiefere, stärkere Wurzelballen und ein dichteres Laub aufweisen, unter anderem können hierfür einheimische Apfelsorte genutzt werden.

Pflanzenzüchtung und Sortenanpassung an verändernde Klimabedingungen finden schon seit jeher statt. Die Klimaänderungen werden mittel- bis langfristig erwartet, so dass ausreichend Zeit für die Umstellung besteht. Allerdings ist bei mehrjährigen Anbaufrüchten wie Baumobst zu beachten, dass die Umstellung nicht kurzfristig möglich ist.

## **4.2 Kosten- und Nutzenbewertung**

Im Rahmen der KlimaZwei-Projekte wurde das Forschungsvorhaben KliO zu „Klimawandel und Obstanbau“ durchgeführt. Ein Schwerpunkt des Projekts beschäftigte sich mit den Schadensauswirkungen auf den Apfelanbau und Kosten der Anpassung. Chmielewski et al. (2009b) enthält Berechnungen für Dormanzschäden, Frostschäden, Schäden durch den Apfelwickler und Schäden durch Änderung aller klimatischer Faktoren sowie Bodenwasserhaushalt und Photosyntheseleistung. Zurzeit kommt es in Deutschland zu na-

hezu keinen Schäden durch Dormanz, da der notwendige Kältereiz im Winter gesetzt wird (Erfüllung des Chilling Requirement). Bei einer Standard-Apfelsorte in Deutschland beträgt dieses Chilling Requirement ca. 900 Stunden unter 7°C pro Winter. Ende des 21. Jahrhunderts könnte es aber möglich sein, dass in einigen Jahren die Dormanz nicht gebrochen wird und dann ein verspäteter Blühbeginn eintritt. Chmielewski et al. (2009b) nehmen an, dass ein Dormanzschaden in diesen Jahren bei 25 % der Erträge liegen kann. Ein Sortenwechsel kann die Dormanzschäden umgehen. Als Häufigkeit für einen Dormanzschaden wird in Chmielewski et al. (2009b) angenommen, dass dieser ab dem Jahr 2070 alle fünf Jahre auftritt.

Frostschäden, die bei Spätfrösten während der Blüte eintreten, werden ebenfalls in KliO analysiert. Zum Beispiel bewirkte der milde Winter 2006/2007 in vielen Regionen Osteuropas (u. a. Polen, Ungarn, Tschechien) bei der Apfelernte Ertragseinbußen durch Spätfröste von bis zu 50 %. In den Szenarien, siehe Chmielewski et al. (2009b), wird für die Region Niederelbe eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit von Spätfrostschäden um weniger als 5 % vorhergesagt. Da in anderen Regionen, zum Beispiel am Bodensee, die Wahrscheinlichkeit für Spätfrostschäden um bis zu 20% zunimmt und darüber hinaus im Gebiet der Niederelbe bereits Frostschutzberegnungsanlagen vorhanden sind, wird diese Schadensgröße für Hamburg als nicht signifikant betrachtet und nicht weiter berücksichtigt. Allerdings ist zu beachten, dass ein durch den Klimawandel veränderter Salzgehalt in der Elbe auch Auswirkungen auf die Möglichkeit der Beregnung hätte. Ein Teilprojekt von KLIMZUG-NORD untersucht diesen Sachverhalt zurzeit.<sup>5</sup>

Apfelwicklerschäden werden von Chmielewski et al. (2009b) exemplarisch für einen erhöhten Schädlingsbefall bei steigenden Temperaturen untersucht. Die KliO-Studie zeigt, dass in der Niederelbe-Region eine weitere Generation des Apfelwicklers auftreten dürfte (von derzeit 2 ½ zu einer dritten Generationen, mit Zunahmen zwischen 0,4 und 0,8 Generationen im B1 beziehungsweise A1B-Szenario (Chmielewski et al. 2009b; Weber und Görgens 2009). Apfelwicklerschäden werden wahrscheinlich auch bei einer anderen Sortenauswahl eintreten. Allerdings werden sie in der Studie exemplarisch für Schädlingsbefall genutzt.

Der direkte Ertragsausfall durch klimatische Veränderungen und damit zusammenhängend eine Veränderung des Bodenwasserhaushalts und der Photosyntheseleistung wird in KliO

---

<sup>5</sup> Weitere Informationen: [http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-05-25-Projekt-des-Monats/termine/2009-04-15-KLIMZUG-NORD-Termine/\\_page-page/29](http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-05-25-Projekt-des-Monats/termine/2009-04-15-KLIMZUG-NORD-Termine/_page-page/29).

mit dem Wasserhaushaltsmodell SIMWASER modelliert. Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung der Erträge durch eine verkürzte Reifezeit, da hohe Sommertemperaturen die Reife der Früchte beschleunigen, so dass weniger Zeit für die Fruchtentwicklung bleibt. In dem Modell wird für das Anbaugebiet Niederelbe in der Variante mit Bewässerung eine Abnahme der Erträge um 1,4 (B1) bis 2,1 (A1B) t/ha berechnet (Vergleich 2071-2100 zu 1961-1990).

Zusammenfassend stellen Chmielewski et al (2009b) fest, dass am Ende des 21. Jahrhunderts 65 bis 75 % des Gesamtschadens durch direkte Ertragsrückgänge aufgrund der klimatischen Bedingungen verursacht sind.

Bei der Nutzenbewertung innerhalb dieser Studie sollen Dormanzschäden, Apfelwicklerschäden und direkte Ertragsänderungen durch klimatische Bedingungen einbezogen werden.

#### **4.2.1 Kostenschätzung**

Innerhalb des KliO-Projekts werden auch die Kosten für Anpassungsmaßnahmen bestimmt, allerdings betrachtet das Projekt keine Anpassung in der Sortenwahl, so dass Kostenkomponenten aus dem KliO-Projekt nicht genutzt werden können.

Die Entwicklung neuer, an das veränderte Klima angepasster Sorten beziehungsweise die Nutzung robuster bereits vorhandener Sorten zielt darauf ab, dass mit Hilfe 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 Erlös zu maximieren. Viele Sorten, die inzwischen von neuen Sorten abgelöst wurden, sind in ihren Eigenschaften robuster und könnten Klimaauswirkungen besser kompensieren. Allerdings wurden diese aus Gründen der geringeren Erträge, durch höhere Anbaukosten oder geringere Erlösen (geringere Preise) von neuen Sorten abgelöst. Da eine genaue Prognose der zukünftigen Verkaufspreise und Kundenwünsche nicht möglich ist, soll hier zur Vereinfachung angenommen werden, dass die Umstellung auf robustere Sorten zum Zweck der Anpassung zu geringeren Erträgen gegenüber heutigen Erträgen führen. 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. Tröltzsch et al. (2012) nehmen zum Beispiel für eine Sortenanpassung einen 10%-igen Rückgang gegenüber den

derzeitigen Erträgen durch die Umstellung auf robustere Sorten an. Als optimistischere weitere Variante soll hier ein 5%-iger Ertragsrückgang angesetzt werden.

Ausgehend vom durchschnittlichen Ertrag der Apfelernte der letzten vier Jahre von 38.977 t pro Jahr für Hamburg (Destatis 2012b), könnte eine geringere Ertragsmenge näherungsweise bei 1.950 bis 3.900 t pro Jahr liegen. Der Schadenswert ergibt sich als Produkt aus dieser Menge und dem Preis für Äpfel. Als Preise wird der Durchschnitt der aktuellen Äpfel-Verkaufspreise der Jahre 2002 bis 2010 verwendet. Der Durchschnitt wird gebildet, da in Abhängigkeit von der Ertragsmenge auch der Apfelpreis pro Jahr variiert. Nach Eurostat (2012) lagen die Apfelpreise in Deutschland zwischen 2002 bis 2100 im Durchschnitt bei 410 Euro/t (Erzeugerpreis). Bei 38.977 t Ausgangsmenge ergibt sich ein Umsatzrückgang von 0,8 bis 1,6 Mio. Euro pro Jahr. Für die Berechnung der Kosten bis 2100 nehmen wir an, dass eine Sortenumstellung gleichmäßig innerhalb der nächsten 30 Jahre stattfindet. Die Kosten für entgangene Einnahmen abdiskontiert auf 2012 liegen bei 16,5 bis 33 Mio. Euro. Als Diskontrate wird nach der Methodenkonvention des Umweltbundesamtes 3 % verwendet (Umweltbundesamt 2007).

Eine große Unsicherheit liegt hier in der Entwicklung der Marktpreise für landwirtschaftliche Produkte in den nächsten Jahrzehnten. Wir greifen hier auf die heutigen Preise zurück, allerdings sind Verschiebungen aufgrund des zukünftigen Angebots beziehungsweise der Nachfrage möglich, zum Beispiel können sich die Konsumwünsche und damit die Nachfrage nach gewissen Sorten verändern. In den letzten Jahren gab es eine Tendenz hin zu hochwertigeren Sorten.

Weitere Kosten entstehen für die Umstellung auf robuste Sorten, zum Beispiel wenn neue Bäume eingesetzt werden. Hier kann allerdings angenommen werden, dass dies bei der regelmäßigen Erneuerung der Bäume circa alle 20 Jahre stattfindet und keine vorherige Umstellung notwendig ist, so dass hier wie in Chmielewski et al. (2009b) keine Zusatzkosten dafür berechnet werden.

Weiterhin können Kosten für Pflanzenzüchtung beziehungsweise Überprüfung der Eignung von Sorten anfallen. Hierfür bestehen verschiedene Institutionen, zum Beispiel die Obstbauversuchsanstalt Jork, die sich speziell mit Obstanbau in Norddeutschland beschäftigt. Die Obstbauversuchsanstalt Jork ist an verschiedenen nationalen und internationalen Projekten beteiligt. So läuft seit 2009 bis 2013 das Projekt ClimaFruit, das sich auf Beerenobst in der Nordseeregion bezieht. Der Budgetanteil der Versuchsanstalt beträgt 415.000 Euro, wobei

die Hälfte durch den Europäischen regionalen Entwicklungsfond ERDF getragen wird (Williams et al. 2010). Die Versuchsanstalt war ebenfalls am BMBF-Projekt KliO beteiligt. Im Rahmen des KLIMZUG-Projekts INKABB steht auch in zwei Teilprojekten die Sortenanpassung im Mittelpunkt. Leider liegen uns nur Daten für ein Teilprojekt vor, welches 600.000 Euro über 5 Jahre erhält (Ulrichs 2011). Eine genaue Zurechenbarkeit für Forschungsausgaben zur Sortenanpassung für das Anbaugebiet in Hamburg zu bestimmen ist schwierig, da die Ergebnisse vielfältig einsetzbar sind. Die Summe soll deshalb nicht in die weiteren Berechnungen einbezogen werden.

#### **4.2.1 Bewertung der Nutzen**

Der Nutzen von angepassten Sorten ist sehr umfangreich. Es werden Ernteerträge gegenüber Hitze oder Stürmen gesichert. Weiterhin weisen robustere Sorten oft höhere Resistenzen gegenüber Schädlingsbefall oder Krankheiten auf. Gerade bei Baumobst mit stärkerem Laub kann durch den stärkeren Schattenwurf teilweise der Sonnenbrand der Blätter vermieden werden.

Im Folgenden soll der vermiedene Schaden bei aufgrund von klimatisch bedingten Schadensereignissen und näherungsweise ein vermiedener Schaden durch Schädlinge oder Krankheiten in die Rechnung einbezogen werden.

#### ***Vermiedener Schaden durch direkte Schadensereignisse***

Für die Bestimmung der Schäden durch Schadensereignisse beziehungsweise die direkten Änderungen aufgrund der Veränderung der klimatischen Faktoren möchten wir mehrere Berechnungsvarianten aufzeigen und auf den Apfelanbau in Hamburg beziehen, die in der Literatur angesprochen wurden.

De Groot (2006) schätzt, dass der Ertrag vorhandener Pflanzensorten ohne Anpassung durch steigende Trockenheit bei verschiedenen IPCC-Szenarien zwischen 22 % und 37 % sinken würde (ab 2071). Für Schäden aus Extremwetterereignissen kann auf Zahlen zu Ernteausfällen bei bereits aufgetretenen Schadensereignissen zurückgegriffen werden. Ein Rückgang von 22 bis 37 % bedeutet umgerechnet auf die durchschnittlichen Erträge der letzten vier Jahre (38.977 t, 2008-2011) 8.575 bis 14.422 t pro Jahr. Auf Basis eines Verkaufspreises von 410 Euro/t bedeutet dies ein Rückgang von 3,5 bis 5,9 Mio. Euro pro Jahr (ab 2071). Welcher

Anteil davon durch eine robustere Sortenwahl vermieden werden kann, ist schwierig zu bestimmen. Allerdings werden bereits bei einer Vermeidung von 50% der Schäden Nutzenbeiträge in Höhe von 1,8 bis 3 Mio. Euro erreicht, die damit über den anfallenden Kosten von 1,6 Mio. Euro liegen. Für den Gesamtschaden über den ganzen Zeitraum wird angenommen, dass zwischen 2040 und 2070 die Schäden halb so hoch sind wie in den Folgejahren, die zwischen 2071 und 2100 auf 1,8 bis 3 Mio. Euro pro Jahr geschätzt werden. Den vermiedenen Gesamtschaden durch robuste Sorten diskontiert auf 2012 schätzen wir nach der Berechnungsmethode nach De Groot zwischen 14 und 24 Mio. Euro.

Wie bereits erwähnt bestimmen Chmielewski et al. (2009b) die klimatischen Veränderungen anhand des Wasserhaushaltsmodells SIMWASER. Die Erträge im Anbaugebiet Niederelbe verringern sich dabei für eine Variante mit möglicher Bewässerung um 1,4 (B1) bis 2,1 (A1B) t/ha (Vergleich 2071-2100 zu 1961-1990). Dies stellt damit einen Minimumwert der Schäden dar, da eine Bewässerung im Gebiet der Niederelbe nicht ausnahmslos möglich sein wird. Für das Hamburger Apfelanbaugebiet von 1.006 ha (Destatis 2012b) kann der Ertrag um 1.408 bis zu 2.113 t pro Jahr zurückgehen (2071-2100). Wie oben diskutiert werden hier Verkaufspreise von 410 Euro/t verwendet, so dass sich ein Erlösrückgang von 577.280 bis 860.330 Euro pro Jahr berechnet. Obwohl es schwierig zu bestimmen ist, welcher Anteil der Schäden durch robustere Sorten vermieden werden kann, wird aber davon ausgegangen, dass dieser Anteil wesentlich ist und bei über 50 % liegt.

Aufgrund der von Chmielewski et al. (2009b) berechneten Ertragsrückgänge kann angenommen werden, dass zwischen 2040 und 2070 die Hälfte der vermiedenen Schäden anfällt. Der vermiedene Gesamtschaden abdiskontiert auf 2012 beträgt zwischen 2,3 und 3,5 Mio. Euro.

Eine weitere Vorgehensweise, welche in der Literatur erwähnt wird, ist die Berechnung anhand des Schadenfalls im Sommer 2003. Verschiedene Wissenschaftler nehmen an, dass Ende des 21. Jahrhunderts jeder Sommer die Anzahl an Sommertagen, heißen Tagen und Höchsttemperaturen wie 2003 erreichen wird (Olesen und Bindi 2004; Hübler und Klepper 2007; Döll und Schulze 2010). Der Sommer zeigte geringe Niederschläge sowie um 3 bis 5°C höhere Sommertemperaturen (Juni-Juli-August) als im Durchschnitt der Jahre 1961-1990 und dies über eine Dauer von mehr als 20 Tagen (Schär et al. 2004, Olesen und Bindi 2004). Für die Apfelerträge lässt sich auf Basis von Destatis-Daten ableiten, dass die Erträge in Hamburg im Jahr 2003 ca. 4.700 t unter dem durchschnittlichen Ertrag der Jahre 1999 bis

2011 lagen (Destatis 2012b, Destatis 2010, Destatis 2009, Destatis 2008, Destatis 2006, Destatis 2005, Destatis 2002, Destatis 2000). Monetarisiert mit dem Verkaufspreis von 410 Euro/t liegt der Erlösrückgang bei 1,94 Mio. Euro pro Jahr. Wie bei den anderen Berechnungen soll angenommen werden, dass über 50 % der Schäden durch robuste Sorten vermieden werden können, so dass der Schaden 0,97 Mio. Euro pro Jahr (für 2071-2100) erreicht. Auch hier soll angenommen werden, dass die Schäden sich auf den Zeitraum 2071-2100 beziehen und dass in den Jahren 2040 bis 2070 der halbe Schaden anfällt. Der Schaden bis 2012 beträgt abdiskontiert auf 2012 7,8 Mio. Euro und liegt damit deutlich über dem auf der Basis von Chmielewski et al. (2009b) berechneten Betrag, der aber wie erwähnt auch einen Minimumwert darstellt. Der berechnete Wert für den vermiedenen Schaden auf der Basis von De Groot liegt mit bis zu 24 Mio. Euro am höchsten und kann als Maximalwert verstanden werden.

#### ***Vermiedener Schaden durch Schädlingsbefall beziehungsweise Krankheiten***

Dem Befall von Schädlingen kann mit robusten Sorten ebenfalls entgegen gewirkt werden. Im Folgenden werden die Schäden anhand des Apfelwicklers aufgezeigt, obgleich sie durch robustere Sorten nicht wesentlich reduziert werden können. Vielmehr soll hiermit die Methodik im Hinblick auf einen Schädlingsbefall verdeutlicht werden. Die Ergebnisse von Chmielewski et al. (2009b) ergeben, dass durch den Klimawandel eine Schadenserhöhung durch eine weitere Generation des Apfelwicklers Ende des 21. Jahrhunderts anfallen wird. Die befallenen Äpfel können noch zu Most verarbeitet und für ein Drittel des Preises verkauft werden. Diese noch bestehende Nutzungsmöglichkeit ist in die Daten bereits eingeflossen. Der Schaden beträgt für die erste Generation des Apfelwicklers 6,7 %, nach der zweiten Generation 8 % und nach der dritten Generation 16,7 %. Um die Schäden für eine Erhöhung von der zweiten auf die dritte Generation zu berechnen, kann die Differenz zwischen den beiden Schäden von 8,7 % genutzt werden. Wenn wir annehmen, dass klimabedingte Schädlinge ähnliche Schadenshöhen auslösen und diese durch robuste Sorten zu circa 50 % vermieden werden können, ergeben sich Nutzen in Höhe von 695.000 Euro pro Jahr ab 2071 (38.977 t, 2008-2011, Preis von 410 Euro/t).

Zur Berechnung des Gesamtschadens setzen wir zwischen 2040 und 2070 die Hälfte der berechneten Summe für Ende des 21. Jahrhunderts an. Zwischen 2071 und 2100 wurde der

Wert von 695.000 Euro pro Jahr genutzt. Der auf 2012 diskontierte Schaden beträgt 4,3 Mio. Euro.

### ***Vermiedener Schaden durch Dormanz***

Bei Dormanzschäden bleibt der notwendige winterliche Kältereiz aus, nach dem erst eine Blüte der Pflanze möglich ist. Für das Ende des 21. Jahrhunderts sagen Chmielewski et al. (2009b) voraus, dass auch an der Niederelbe nicht in jedem Jahr die ausreichende Temperatur erreicht werden wird. Durch einen Sortenwechsel können die Dormanzschäden vermieden werden. Auf Basis der Ergebnisse von Chmielewski et al. (2009b) nehmen wir an, dass in einem Jahr mit Dormanzschaden die Schäden in einem 25 % niedrigerem Ertrag liegen. Ein fehlender Kältereiz wird für jedes fünfte Jahr ab 2070 erwartet. Es wird angenommen, dass der ganze Schaden durch eine Sortenanpassung vermieden werden kann. Für den durchschnittlichen Apfelertrag über die Jahre 2009-2011 in einer Höhe von 38.977 t wäre dies ein Ausfall von 9.744 t Ertrag pro Schadensjahr, und verteilt über eine Periode von fünf Jahren 1.950 t pro Jahr.

Für den Zeitraum ab 2070 fallen damit geringere Erlöse von 799.000 Euro pro Jahr an (Verkaufspreis: 410 Euro/t). Diskontiert auf 2012 ergibt dies einen vermiedenen Gesamtdormanzschaden in Höhe von 2,9 Mio. Euro (Schäden berechnet bis 2100).

### ***4.2.3 Vergleich Kosten und Nutzen***

Die auf 2012 diskontierten Kosten des Zeitraums 2012 bis 2100, wobei hier nur entgangene Einnahmen einbezogen werden, betragen zwischen 16,5 und 33 Mio. Euro.

Als Nutzen wurden drei Komponenten berechnet:

- Vermiedene Schäden aufgrund von klimatischen Schadensereignissen wie Trockenheit. Die Ergebnisse wurden anhand von drei verschiedenen Ansätzen berechnet und liegen zwischen 4,6 und 24 Mio. Euro, wobei ein Wert um 7 bis 10 Mio. Euro als realistisch eingeschätzt wird.
- Vermiedener Schaden durch Schädlinge. Hier wurde eine grobe Abschätzung vorgenommen, die einen Wert von 4,3 Mio. Euro ergab.
- Der vermiedene Schaden durch Dormanz konnte auf 2,9 Mio. geschätzt werden.

Alle Nutzenkomponenten ergeben zusammengefasst 17,5 Mio. Euro (für klimatische Schadensereignisse wurde mit einer Höhe von 10 Mio. Euro gerechnet).

Es zeigt sich, dass im positiven Fall die einbezogenen Nutzen die Kosten aufwiegen können. In Fällen mit hohem Ertragsrückgang durch robuste Sorten die Kosten aber auch über den hier einbezogenen Nutzen liegen können. Eine Umstellung kann sinnvoll sein, sollte aber nicht verfrüht erfolgen.

### **4.3 Bewertung der Maßnahme**

Die Maßnahme des Wechsels zu robusteren Sorten dient zur Sicherung der Erträge in der Landwirtschaft. Es ist allerdings weiter zu diskutieren, welchen Anteil der Schäden angepasste Sorten vermeiden können. Dafür konnten in der Studie nur grobe Annahmen getroffen werden. Ein Sortenwechsel hin zur Nutzung robusterer Sorten wird prinzipiell von privaten Akteuren vorangetrieben. Es kann hier notwendig sein, aus öffentlichen Geldern unterstützende Forschungsarbeiten zu finanzieren. Die Finanzierung von Forschung zeigt Freifahrer-Effekte, da Ergebnisse auch von anderen Akteuren genutzt werden können, so dass private Akteure einen begrenzten Anreiz sehen, selbst in Forschung zu investieren. Eine öffentliche Finanzierung ist daher angeraten.

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.

Bei der Implementierung ist zu beachten, dass die lokalen Gegebenheiten eine hohe Bedeutung haben und die Ertragssituation der robusten Sorten wesentlich beeinflussen können. Vor allem ist die Verfügbarkeit von Wasser eine wesentliche Komponente, die zurzeit schlecht vorhergesagt werden kann, da sie ebenfalls vom Klimawandel beeinflusst wird.

Die Akzeptanz eines Sortenwechsels ist bei Landwirten nicht immer gegeben. Einige Landwirte stehen diesem eher positiv gegenüber, wobei klassische Pflanzenzüchtung wohl eher akzeptiert wird als gentechnisch veränderte Sorten. Darüber hinaus müssen sich die Konsumenten an diese robusten Sorten gewöhnen, das heißt diese müssen sich am Markt durchsetzen.

Weiterhin gilt es zu beachten, dass der Klimawandel für die deutsche Landwirtschaft vor allem mittelfristig nicht nur negative Konsequenzen bringen muss. Höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Luft befördern das Pflanzenwachstum. Darüber hinaus sind Anbaugebiete in anderen Regionen wohl stärker betroffen, so dass sich Marktpreise durchaus erhöhen können, wovon die deutschen Erzeuger profitieren würden.

#### 4.4 Fallstudienliteratur

- Chmielewski, F.-M. (2011): Klimawandel und Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg. In: Storch, H.; Claußen, M. (Hrsg.): Klimabericht der Metropolregion Hamburg. Springer Verlag, 211-227.
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Henniges, Y.; Müller, A.; Weber, R. W. S. (2009a): Klimawandel: Chancen, Risiken und Kosten für den deutschen Obstbau. In: Mahammadzadeh, M.; Biebeler, H.; Bardt, H. (Hrsg.): Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen. Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele. Köln.
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Henniges, Y.; Müller, A. (2009b): Klimawandel und Obstanbau in Deutschland. Abschlussbericht des Teilprojektes der HU Berlin. Berlin.
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Henniges, Y.; Müller, A.; Görgens, M.; Weber, R. W. S.; Kemfert, C.; Kremers, H. (2007): Klimawandel und Obstanbau in Deutschland. KliO Gesamtbericht für den Bearbeitungszeitraum 01.07.2006 bis 30.04.2007. [http://www.accc.gv.at/pdf/Klimawandel\\_und\\_Obstbau\\_.pdf](http://www.accc.gv.at/pdf/Klimawandel_und_Obstbau_.pdf), (Download am 08.06.2012).
- De Groot, R.S. et al. (2006): Climate adaptation in the Netherlands. Bilthoven. Online verfügbar unter <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500102003.pdf>, (Download am 04.02.2011).
- Destatis (2000): Land- und Forstwirtschaft, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3, Reihe 3. 1999. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2002): Land- und Forstwirtschaft, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3, Reihe 3. 2001. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2005): Land- und Forstwirtschaft, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3, Reihe 3. 2003. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2006): Land- und Forstwirtschaft, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3, Reihe 3. 2005. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2008): Land- und Forstwirtschaft, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3, Reihe 3. 2007. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2009): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Wachstum und Ernte – Obst. Fachserie 3, Reihe 3.2.1. 2008. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2010): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Wachstum und Ernte – Obst. Fachserie 3, Reihe 3.2.1. 2009. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Destatis (2012a): Basisdaten Bruttowertschöpfung: Sektor Landwirtschaft. Stand: 2010. [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Internationales/Thema/Tabellen/Basistabelle\\_LWWertschoepfung.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Internationales/Thema/Tabellen/Basistabelle_LWWertschoepfung.html), (Download am 08.06.2012).
- Destatis (2012b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Wachstum und Ernte – Obst. Fachserie 3, Reihe 3.2.1. 2011. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Döll, S.; Schulze, S. (2010): Klimawandel und Perspektiven der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg. Hamburg. HWWI Research Paper 1-34. Hamburg.
- Eurostat (2012): Verkaufspreise pflanzlicher Produkte: Tafeläpfel: alle Sorten. Stand: 13.4.2012.
- Hübler, M.; Klepper, G. (2007): Kosten des Klimawandels: Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/2kosten-des-klimawandels-die-wirkung-steigender-temperaturen-auf-gesundheit-und-leistungsfahigkeit>, (Download am 05.02.2011).
- Kowalewski, J.; Schulze, S. (2010): Die Struktur der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg. HWWI Research Paper 1-33. Hamburg.

- Norddeutsches Klimabüro (2012): Norddeutscher Klimaatlas. <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>, (Download am 11.05.2012).
- Olesen, J.E., Bindi, M. (2004): Agricultural Impacts and Adaptations to Climate Change in Europe. Available at [http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/artigos\\_dissertacoes/artigos\\_ingles/](http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/artigos_dissertacoes/artigos_ingles/), (Download am 30.03.2011).
- Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A.; Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. In: *Nature*, Vol. 427, S. 332-336.
- Schaller, M.; Weigel, H.-J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 316.
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau.
- Ulrichs, C. (2011): Persönliche Kommunikation.
- Umweltbundesamt (2007): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Dessau.
- 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.
- Weber, R. W. S.; Görgens, M. (2009): Klimawandel und Obstanbau in Deutschland. Abschlussbericht des Teilprojektes OVA Jork. Jork.
- Williams, M. Faby, R.; Binnewies, U. (2010): ClimaFruit - Beerenobst mit Zukunft. Neues Interreg IVB-Projekt mit Beteiligung der Obstbauversuchsanstalt Jork. In: *Mitteilungen der Obstversuchsanstalt*, Nr.65, 3/2010, S. 79.

## **5 Fallstudie 4: Handlungsfeld Katastrophenschutz – Der Starkregen im Juni 2011**

### **5.1 Problemstellung**

Starkregenereignisse und damit verbundene Überschwemmungen können erhebliche private und volkswirtschaftliche Schäden verursachen. Besonders in Siedlungsgebieten, in denen der Anteil der versiegelten Flächen hoch ist, kann das Regenwasser bei extremen Niederschlagswerten in kurzer Zeit häufig nicht schnell genug auf natürliche Weise abgeleitet werden. Solche Sturzfluten führen in der Folge oft zu einer Überlastung der bestehenden Abwassersysteme, so dass Straßen, Wege sowie Wohn- und Geschäftsräume überflutet werden.

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sieht es als wahrscheinlich an, dass der Klimawandel zu einer Veränderung der Intensität und Häufigkeit extremer Wetterereignisse führt. Darunter fällt für Regionen der nördlichen mittleren Breiten auch eine Zunahme von Starkniederschlägen im Laufe des 21. Jahrhunderts insbesondere in den Wintermonaten, auch wenn über das Jahr verteilt eine Abnahme der Niederschlagsmengen erwartet wird (IPCC 2012, S. 13). Auf diese Situation werden sich Haushalte, Unternehmen und Gemeinden einstellen müssen. Die Grundlage für eine effektive Anpassung ist dabei ausreichendes lokales Klimawissen sowie der Zugang zu Klimainformationen und -dienstleistungen seitens der Entscheidungsträger (Brasseur und von Flotow 2010, S. 5). Darüber hinaus sollten die Akteure in der Lage sein, die Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen einschätzen und gegenüber stellen zu können.

Wie Brasseur und von Flotow (2010, S. 6) feststellen, fehlt es in Deutschland jedoch an flächendeckenden Klimainformationen zu regionalen Veränderungen ebenso wie an genauen Folgen- und Schadenmodellierungen. Daher werden Anpassungsmaßnahmen unzureichend umgesetzt und entstehen hohe private und öffentliche Schadenskostenpotenziale.

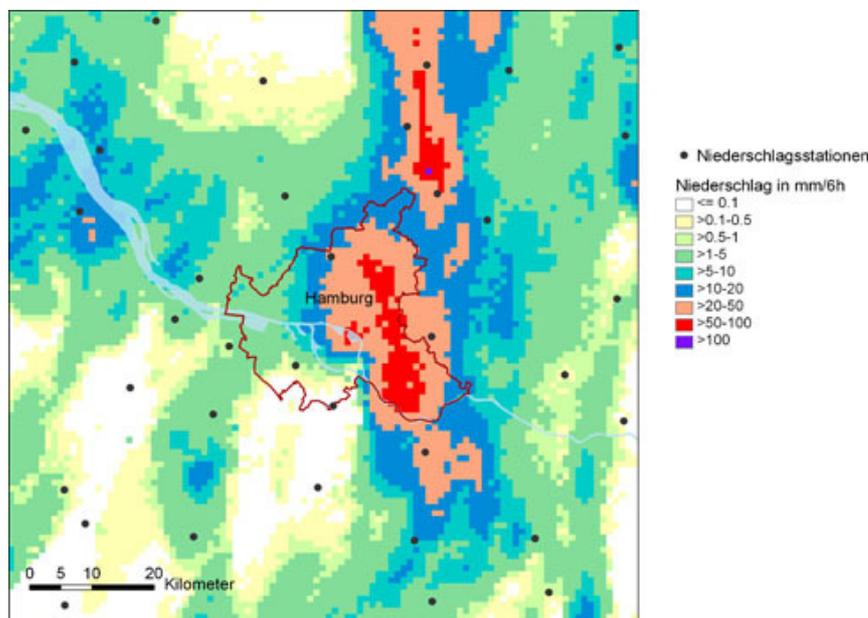
Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, anhand eines Fallbeispiels für die Stadt Hamburg Möglichkeiten zur Abschätzung der zu erwartenden Schäden infolge eines Extremwetterereignisses aufzuzeigen. Dabei widmet sich die Arbeit rückblickend dem Starkregenereignis am 06. Juni 2011 unter der Annahme, dass ähnliche Wetterlagen im Zuge des Klimawandels vermehrt auftreten werden. Die Kostenschätzung greift auf bestehende Methoden zurück und arbeitet diese in ein konsistentes Grundgerüst ein, so dass eine Übertragbarkeit auf andere Schadensereignisse möglich ist. Darüber hinaus werden bestehende Daten- und In-

formationsdefizite aufgezeigt. Auf Maßnahmen, die zur Vermeidung der Schäden durchgeführt werden könnten, geht die Arbeit ebenfalls kurz ein, verweist für detaillierte Informationen allerdings auf weiterführende Literatur.

## 5.2 Ereignisverlauf

Das gesamte Stadtgebiet war von dem Hamburger Starkregenereignis am 6. Juni 2011 betroffen. Teilweise fielen mehr als  $50 \text{ l/m}^2$  (Behörde für Inneres und Sport 2011). Laut Hamburger Abendblatt (2011b) ergaben Messungen des Instituts für Wetter- und Klimakommunikation (IWK) in der Spitalerstraße in der Altstadt zwischen 17.00 und 18.10 Uhr je Quadratmeter sogar 81,3 Liter Regen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert ein Starkregenereignis als ein Ereignis, bei dem  $10 \text{ bis } 25 \text{ l/m}^2$  in einer Stunde oder  $20 \text{ bis } 35 \text{ l/m}^2$  in sechs Stunden fallen (Deutscher Wetterdienst o. J.). Abbildung 1 zeigt die Niederschlagsverteilung für den 6. Juni 2011 in der Zeit von 12.00 bis 18.00 Uhr über dem Großraum Hamburg, die vom Seewetteramt aus Radarmessungen des DWD ermittelt wurde.

**Abbildung 1: Niederschlagsverteilung für den 06.06.2011 (12 bis 18 UTC) über dem Großraum Hamburg**



Quelle: KLIMZUG-Nord (2011), S. 9.

Die Feuerwehr rief um 16.00 Uhr den Ausnahmezustand aus. Für diesen Fall hält auch das Technische Hilfswerk (THW) in Hamburg Schnelleinsatztruppen bereit, die die Feuerwehr bei

der Bewältigung der Arbeiten unterstützen (THW Hamburg-Nord 2011). So waren zeitweise 1.000 Einsatzkräfte zeitgleich im Einsatz, darunter 50 Helfer des THW sowie Einsatzkräfte von 63 Freiwilligen Feuerwehren (Behörde für Inneres und Sport 2011). Insgesamt verzeichnete die Feuerwehr in 24 Stunden 2.225 Einsätze, wovon 1.293 wetterbedingt waren (Behörde für Inneres und Sport 2011). Zum Vergleich: an normalen Tagen liegt die durchschnittlich Zahl der Einsätze bei 630 (Focus Online 2011).

Die Einsatzschwerpunkte lagen entsprechend der Verteilung der Niederschlagsmengen (Abbildung 1) im Osten Hamburgs und in der Innenstadt (Behörde für Inneres und Sport 2011). Allein im Gebiet des Zitterpappelwegs in Hamburg Wellingsbüttel wurden 40 Einsätze verzeichnet (Angaben Herr Falldorf, Feuerwehr Hamburg, 04.05.2012). Vorwiegend handelte es sich bei den gemeldeten Einsatzarten um vollgelaufene Keller von Wohn und Gewerbegebäuden, was den Einsatzberichten der Freiwilligen Feuerwehren zu entnehmen ist (u. a. Freiwillige Feuerwehr Wellingsbüttel o. J.). Allein die Berufsfeuerwehr und die Rufbereitschaft verzeichneten 788 Einsätze, von denen 635 aufgrund von vollgelaufenen Kellern waren (Angaben Frau Hüffmeyer, HAMBURG WASSER, 11.05.2012). Auch Fußgänger- und Verkehrswege waren aufgrund von Überschwemmung nicht mehr passierbar. So kam es mitten im Berufsverkehr zu erheblichen Verzögerungen. Auch am Folgetag waren noch Kräfte der Feuerwehr im Einsatz, um Aufräumarbeiten fortzusetzen (Hamburger Abendblatt 2011b).

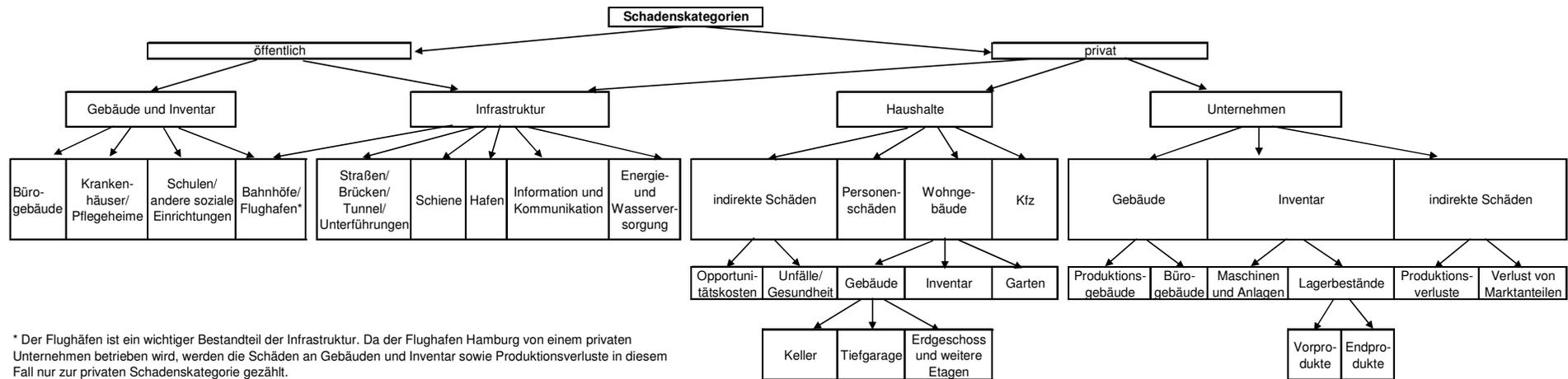
### **5.3 Vorgehen**

Eine ausführliche Recherche im Vorfeld der Arbeit hat ergeben, dass keine zentrale Erfassung der Schäden oder der betroffenen Gebäude, Straßen oder anderer Elemente stattgefunden hat. Daher wurde der vorwiegende Teil der Informationen zu dem Verlauf des Starkregenereignisses und der damit verbundenen Schäden am 06. Juni 2011 in Hamburg Zeitungsartikeln und persönlichen Gesprächen mit regionalen Akteuren entnommen. Zu den Gesprächspartnern gehörten Hans-Werner Falldorf (Feuerwehr Hamburg), Dieter Ackermann (LSBG), Meike Müller (Deutsche Rück) und Nina Hüffmeyer (HAMBURG WASSER). Außerdem wurde ein Großteil der Einsatzberichte der Freiwilligen Feuerwehren in Hamburg ausgewertet, um einen Eindruck über die Einsatzarten zu bekommen.

Die Schäden wurden zunächst in Schadenskategorien eingeteilt. Diese sind angelehnt an die Einteilung der URBAS-Studie des Landesbetriebs Straßen, Brücken und Gewässer (2008), zeigen in einigen Bereichen allerdings eine höhere Auflösung. Die durch das Starkregener-

eignis in Hamburg entstandenen Schäden wurden diesen Kategorien zugeordnet. Auf Grundlage der vorliegenden Quellen konnten allerdings nur anekdotische Schadensfälle aufgeführt werden. Sofern möglich, wurden den einzelnen Kategorien im Folgenden Schadensfunktionen zugeordnet, die aus der Literatur entnommen wurden. Teilweise wurden auch eigene Kalkulationen angestellt und nachvollziehbar dargestellt. Dieses Vorgehen kann dazu beitragen, bestehende Schätzmethode zu etablieren und gleichzeitig methodische Lücken zu füllen. Außerdem gewährleistet das transparente Vorgehen die Übertragbarkeit auf andere Schadensereignisse.

Abbildung 2: Schematische Darstellung ausgewählter Schadenskategorien



\* Der Flughafen ist ein wichtiger Bestandteil der Infrastruktur. Da der Flughafen Hamburg von einem privaten Unternehmen betrieben wird, werden die Schäden an Gebäuden und Inventar sowie Produktionsverluste in diesem Fall nur zur privaten Schadenskategorie gezählt.  
Quelle: HWWI 2012.

### **5.3.1 Schadenskategorien**

Für eine Abschätzung der durch das Starkregenereignis entstandenen Schäden ist es sinnvoll, diese in Schadenskategorien einzuteilen. Dies ermöglicht eine systematische Erfassung der Schäden, denen dann entsprechende Kosten beziehungsweise Schadensfunktionen zugewiesen werden können. Abbildung 2 veranschaulicht die verschiedenen Kategorien, die im Folgenden in Bezug auf das Starkregenereignis in Hamburg näher betrachtet werden. Es wird dabei zunächst zwischen öffentlichen und privaten Schäden unterschieden. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass sich die finanziellen Mittel sowie die Anreize zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zwischen öffentlichen und privaten Akteuren unterscheiden.

### **5.3.2 Schadensbeschreibung**

#### **5.3.2.1 Schäden an öffentlichen Gebäuden und Infrastruktur**

##### ***Gebäude***

Verschiedene öffentliche Gebäude waren durch einfließendes Wasser betroffen. Hierzu gehörte unter anderem der Hamburger Hauptbahnhof, der großräumig gesperrt werden musste bis das Wasser abgepumpt werden konnte (Focus Online 2011). Doch auch in den Teilen, die von den Fahrgästen noch passierbar waren, stand das Wasser teilweise mehrere Zentimeter hoch. Auch im Rathaus und in der Innenbehörde kamen Feuerwehkräfte zum Einsatz, da Wasser in die Technikräume drang (Hamburger Abendblatt 2011a). Weiterhin waren die Staatsoper und das US-amerikanische Konsulat betroffen (NDR 2011).

##### ***Infrastruktur***

Fußgänger- und Verkehrswege waren aufgrund von Überschwemmung teilweise nicht mehr passierbar. In Wellingsbüttel, wie auch in anderen Stadtteilen, standen ein Fußgängertunnel und eine S-Bahnunterführung unter Wasser; ferner waren Straßen und Gräben überschwemmt (Freiwillige Feuerwehr Wellingsbüttel o. J.).

Im Schienenverkehr kam es auch zu erheblichen Verzögerungen. Im Hauptbahnhof musste ein Gleis aus Sicherheitsgründen zeitweise gesperrt werden, da Wasser auf die Oberleitungen floss (Blaulicht 2011). Der S-Bahn Verkehr der Linie zwischen Ohlsdorf und Poppenbüttel kam wegen umgestürzter Bäume für knapp drei Stunden zum Erliegen (Blaulicht 2011). Daneben konnte die U-Bahnlinie 2 zeitweise nicht mehr an den Haltestellen Jungfernstieg und Gänsemarkt halten, da das Wasser hier teilweise knöchelhoch stand. Auch im eingerichteten

Ersatzverkehr mit Bussen kam es zu erheblichen Verspätungen (Focus Online 2011, Hamburger Abendblatt 2011a).

Der Flugverkehr am Flughafen musste für eine halbe Stunde eingestellt werden (Hamburger Abendblatt 2011b). Da der Hamburger Flughafen privatwirtschaftlich betrieben wird, werden die entstandenen Kosten für Reparaturen, Reinigung usw. in diesem Fall allerdings zu den Schäden der Unternehmen (Unterabschnitt 4.2.3) gezählt.

Der Druck der Wassermassen in der Kanalisation führte teilweise dazu, dass Gullydeckel aus ihrer Fassade gelöst wurden (Hamburger Abendblatt 2011b).

### **5.3.2.2 Schäden der Haushalte**

#### ***Wohngebäude***

In den vom Starkregenereignis betroffenen Gebieten wurden zahlreiche Keller, Parterrewohnungen und teilweise auch Dachwohnungen überflutet (Flomm 2011). Außerdem liefen vielerorts Tiefgaragen voll Wasser (Einsatzberichte der Freiwilligen Feuerwehren). Über die Anzahl der betroffenen Gebäude liegen keine Angaben vor.

An der Willi-Brandt Straße wurde die Fassade eines Gebäudes unterspült und drohte einzustürzen (Hamburger Abendblatt 2011b).

#### ***Personenschäden***

Insgesamt ist aus den vorliegenden Quellen zu entnehmen, dass drei Personen während des Ereignisses verletzt wurden: Ein Mann wurde von einem Blitz getroffen und ins Krankenhaus eingewiesen (Hamburger Abendblatt 2011a). Eine weitere Person wurde bei der Räumung der Europa-Passage von herabfallenden Deckenteilen am Handgelenk getroffen (Hamburger Abendblatt 2011a). Zudem wurde ein Feuerwehrmann bei einem Einsatz durch einen Stromschlag verletzt und musste zur Beobachtung in ein Krankenhaus gebracht werden (Behörde für Inneres und Sport 2011).

#### ***Kraftfahrzeuge***

Aus den Zeitungsberichten ist zu entnehmen, dass Autos in bis zu einem halben Meter tiefen Pfützen stecken blieben (Hamburger Abendblatt 2011b).

#### ***Indirekte Schäden***

Im Schienen- und Straßenverkehr musste vielerorts in Hamburg über mehrere Stunden mit erheblichen Verzögerungen gerechnet werden. Die Zeit, die die betroffenen Personen mit

Warten oder Fahren von Umwegen verbringen, kann als indirekter Schaden in Form von Arbeits- und Freizeitverlusten aufgefasst werden.

Gesundheitliche Folgeschäden sind nicht dokumentiert. Eine gesundheitliche Gefährdung könnte grundsätzlich beispielsweise von der Ausbreitung von Kolibakterien aus kontaminiertem Wasser hervorgehen.

### **5.3.2.3 Schäden der Unternehmen**

#### ***Gebäude und Inventar***

In den vom Starkregen betroffenen Stadtteilen liefen zahlreiche Keller von Geschäften, Bürogebäuden und Hotels voll (Hamburger Abendblatt 2011b).

In zwei Geschäften und einem Kundenzentrum im Hauptbahnhof drang Wasser ein, was zu erheblichen Schäden führte (Focus Online 2011). Auch das Hotel Atlantik war von eindringendem Wasser betroffen (NDR 2011). Ebenfalls betroffen waren das Alstertal-Einkaufszentrum und die Europa-Passage. Das Untergeschoss der Europa-Passage musste von Feuerwehr und Polizei sogar geräumt werden, da Wasser einbrach und Zwischendecken einstürzten (Hamburger Abendblatt 2011b).

Weiterhin wurden in einem Bekleidungsgeschäft in der Mönckebergstraße der Lagerraum und der Verkaufsraum von eindringendem Wasser beschädigt sowie brach eine abgehängte Decke im ersten Untergeschoss ein. In der gleichen Straße war auch der Keller eines Backwarengeschäfts mit einem dünnen Wasserfilm belegt (THW Hamburg-Nord).

Ein Gastronomiebetrieb in Winterhude, dessen Geschäftsräume teilweise im Souterrain liegen, wurde ebenfalls von den Wassermassen überrascht. Etwa 20 Minuten stand das Wasser hier fast einen Meter hoch. Da es sich bei dem eindringenden Wasser in diesem Fall nicht nur um reines Regenwasser handelte, sondern auch um kontaminiertes Wasser, wurde der Gastwirtin eine aufwendige Desinfektion der Räume auferlegt. Erst nach der Sanierung darf das Geschäft wieder für die Kunden öffnen (Flomm 2011).

Weitere Einzelfälle wurden im Mittelweg dokumentiert, wo Mitarbeiter eines Geschäfts Wasser aus den Verkaufsräumen schöpften (Hamburger Abendblatt 2011b). Außerdem wurde im Stadtteil Steilshoop ein Wassereintritt in einem Fitnesscenter gemeldet (Einsatzberichte der Freiwilligen Feuerwehren).

## ***Indirekte Schäden***

Produktionsverluste infolge des Ereignisses sind nicht dokumentiert. Es ist allerdings davon auszugehen, dass zahlreiche Einzelhandelsgeschäfte während der Reinigungs- und Sanierungsarbeiten schließen mussten. Insbesondere die Gebäude, in denen Gefahr durch Deckeneinbrüche oder ähnliches bestand, wie beispielsweise in der Europa-Passage, werden von Ertragseinbußen betroffen gewesen sein. Ebenso ist davon auszugehen, dass Mitarbeiter in Büros, in denen Wasserschäden auftraten, während und teilweise nach dem Ereignis nur eingeschränkt tätig sein konnten.

## **5.4 Kostenschätzung**

### ***5.4.1 Richtwerte für die Schadenshöhen***

#### ***Schadenskosten für öffentliche Gebäude***

Faber et al. (2005) nehmen in ihrer Risikoanalyse des bestehenden Hochwasserschutzes der Stadt Gleisdorf und Umgebung (Österreich) eine Einteilung der Schadensobjekte in Klassen vor und weisen diesen Schadensfunktionen zu. In Anlehnung an diese Studie wird für öffentliche Gebäude ein Schaden von 11.202 Euro pro Gebäude als untere Grenze (Wassertiefe  $\leq 0,5$  m) und ein Schaden von 50.411 Euro als obere Grenze (Wassertiefe  $>0,5$  m) angenommen (S. 181). Zu den vom Starkregenereignis betroffenen Gebäuden in Hamburg zählen laut den veröffentlichten Zeitungsartikeln die Staatsoper, das Rathaus und der Hauptbahnhof.

#### ***Öffentliche Infrastruktur***

Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (2008) unternahm in dem Projekt URBAS anhand eines Fallbeispiels für Hamburg bereits eine Abschätzung der Schäden durch Sturzfluten. In ihrer Analyse nimmt das Projekt an, dass bei einem vergleichbaren Gewitterereignis im Jahr 2002 insgesamt 30 Schienen, Straßen, Tunnel und Unterführungen unter Wasser standen. Die dadurch entstandenen baulichen Schäden wurden auf 114.000 Euro (in Preisen von 2002) geschätzt.

Schadensfunktionen für einzelne Schadenskategorien, die herangezogen werden können, wenn entsprechende Schadensdaten vorliegen, finden sich beispielsweise in dem Hochwasseraktionsplan Emscher (Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004) oder in einer Untersuchung für Österreich in Faber et al. (2005). Für die Schäden an Straßen und Wegen wurden in dem Hochwasseraktionsplan Emscher folgende Werte angesetzt: 2,56 Euro/m<sup>2</sup> für über-

schwemmte Straßen, 1,28 Euro/m<sup>2</sup> für Wege und 7.650 Euro/Objekt für Brücken (Emscher-genossenschaft Lippe Verband 2004, S. 12). In der Risikoanalyse für die Stadt Gleisdorf wird angenommen, dass bei einem Ereignis mittlerer Intensität (Tiefen >0,5 m) die Schäden an Verkehrsanlagen mit 10 m Breite 42 Euro pro Meter betragen, wobei sich diese zwischen Autobahnen (mit 25 m Breite 105 Euro/m), Gemeindestraßen (mit 8 m Breite 34 Euro/m) und Eisenbahn (Einspur 21 Euro/m) stark unterscheiden (Faber et al. 2005, S. 182).

### ***Schadenskosten der Wohnbebauung***

Für Wohnbebauung werden zahlreiche Schadenswerte in der Literatur angegeben, die meist aus empirischen Befunden vergangener Hochwasserereignisse abgeleitet wurden. Generell lässt sich festhalten, dass die Höhe des Schadens auch von der Art des eingedrungenen Wassers abhängt. Reines Regenwasser richtet dabei weit weniger Folgeschäden an als rückgestautes Wasser aus den Sielen, in dem Fäkalien mitgespült werden. Neben der Reinigung der Räume ist dann zusätzlich eine gründliche Desinfektion erforderlich (Flomm 2011).

Bei einem Hochwasser in der Stadt Ahlen in Nordrhein-Westfalen im Jahr 2011 wurde ein mittlerer Wohngebäudeschaden von 3.000 Euro festgestellt, wenn nur der Keller betroffen war. Die Schäden konnten hier meist durch Trocknung behoben werden. Der Durchschnittschaden stieg allerdings auf 23.000 Euro an, wenn auch das Erdgeschoss betroffen war (Müller 2003, S. 22).

In der URBAS Fallstudie für Hamburg wurde für 1.000 vollgelaufene Keller ein Schaden von 7,74 Mio. Euro, also ein mittlerer Schaden von 7.740 Euro pro Keller, angenommen (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer 2008, S. 18).

Schadensberechnungen in dem Projekt XtremRisk<sup>6</sup> legten für den Stadtteil Wilhelmsburg detaillierte Schadensfunktionen für die Wohnbebauung zu Grunde. Für ein Einfamilienhaus mit Keller ergeben sich bei einem Wasserstand von 20 cm Schadenkosten in Höhe von 9.400 bis 28.000 Euro. Davon entfallen 4.800 beziehungsweise 19.000 Euro auf das Gebäude selbst, 2.800 beziehungsweise 6.700 Euro auf das Inventar und 1.800 beziehungsweise 2.300 Euro auf die Trocknung und Reinigung. Die Spannbreite ergibt sich aus dem zugrunde gelegten Sanierungs- und Reinigungsbedarf sowie unterschiedlichen Einrichtungsgegenständen des Kellers.

---

<sup>6</sup> Informationsaustausch mit Gehad Ujeyl vom Institut für Wasserbau der TUHH. Informationen zum genannten Projekt finden sich unter [www.xtremrisk.de](http://www.xtremrisk.de).

Diese Werte ähneln denen der Schadensfunktionen in Faber et al. (2005). Für ein Ein- oder Zweifamilienhaus nehmen sie einen Schaden pro Gebäude von 8.402 Euro bei einem Ereignis von schwacher Intensität an (Wassertiefe  $\leq 0,5$  m) und einen Schaden von 44.810 Euro für ein Ereignis mittlerer Intensität (Wassertiefe  $> 0,5$  m).

### ***Opportunitätskosten***

Das Starkregenereignis in Hamburg ereignete sich in den frühen Abendstunden. Daher ist anzunehmen, dass es sich bei den betroffenen Auto- und Bahnfahrern vorwiegend um Berufspendler im Feierabendverkehr handelte. Ein Großteil der Opportunitätskosten dürfte somit auf entgangene Freizeit der betroffenen Personen entfallen. Zeitverluste, die durch temporäre Straßensperrungen und dadurch hervorgerufene Umwegfahrten entstehen können, sind generell schwer zu monetarisieren, da subjektive Einschätzungen hier stark variieren können. Trotzdem finden sich in der Literatur Ansätze, um Opportunitätskosten messbar zu machen. Tröltzsch et al. (2011, S. 16) legen in ihren Kosten-Nutzen-Analysen beispielsweise Zeitkosten von 6 Euro pro Stunde als Mittel von privaten und geschäftlichen Reisen zu Grunde.

Verkehrsunfälle wurden während des Extremereignisses in Hamburg nicht festgestellt. Um die Schäden durch Unfälle generell abschätzen zu können geben Tröltzsch et al. (2011, S. 17) einen Richtwert für die Kosten pro schwerer Verletzung von 229.400 Euro an.

### ***Schadenskosten der Gewerbe- und Industriebauten***

Faber et al. (2005) setzten bei einem Ereignis mittlerer Intensität einen Schaden von 28.006 Euro für ein Gewerbegebäude (308 Euro/m<sup>2</sup>) und 33.607 Euro für ein Industriegebäude (375 Euro/m<sup>2</sup>) an. Bei einem Ereignis mit Wassertiefe von über 0,5 m belaufen sich die Schadenskosten bereits auf 140.031 Euro (1.400 Euro/m<sup>2</sup>) für ein Gewerbegebäude und 196.043 Euro für ein Industriegebäude (1.960 Euro/m<sup>2</sup>).

Die URBAS Fallstudie für Hamburg hat für ein Industriegebäude einen durch Starkregen verursachten Schaden in Höhe von 290.784 Euro angenommen (Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer 2008, S. 18).

Im Gegensatz zu den beiden bereits genannten Studien liefert die Studie der Emschergenossenschaft relative Schadensfunktionen. Hier wird zudem eine grobe Wirtschaftszweigeinteilung vorgenommen. Für den Bereich der Energie- und Wasserversorgung wird eine Scha-

densfunktion von  $Y = 6 \cdot \sqrt{x}$  angenommen, wobei  $Y$  den Schaden in % am Vermögen und  $x$  die Wasserstandshöhe über Gelände in Meter darstellt. Für Industrie und Gewerbe liegt die Schadensfunktion  $Y = 27 \cdot \sqrt{x}$  zu Grunde (Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004, S. 9).

Da für das Starkregenereignis keine genauen Informationen zu der Anzahl der betroffenen Gewerbe- und Industriebetriebe vorliegt, wird für diesen Fall auf eine Schätzung anhand der relativen Schadensfunktionen zurückgegriffen. Für die Ermittlung der Schäden sind allerdings Informationen zum Vermögen der betroffenen Betriebe notwendig. Da diese in der Regel nicht zur Verfügung stehen, kann hier eine Abschätzung durch die Ableitung der sektoralen Bruttoanlagevermögen auf der regionalen Ebene von den Daten der nationalen Ebene weiterhelfen. Tabelle 1 zeigt das Bruttoanlagevermögen pro Beschäftigten in Deutschland und das anhand der Beschäftigtenzahlen geschätzte Bruttoanlagevermögen für Hamburg.

**Tabelle 1: Bruttoanlagevermögen für Deutschland und Hamburg 2007**

Sektor	Deutschland			Hamburg			
	Anlagevermögen pro Beschäftigten			Beschäftigte absolut	Anlagevermögen		
	insgesamt	Ausrüstungen und Anlagen	Bauten		insgesamt	Ausrüstungen und Anlagen	Bauten
	Millionen				Millionen		
Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bergbau	0,762	0,275	0,487	2.942	2.243	809	1.434
Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung	0,165	0,097	0,068	7.577	1.250	733	517
Textil- und Bekleidungsindustrie	0,208	0,081	0,127	547	114	44	70
Holzgewerbe (ohne Herstellung von Möbeln)	0,122	0,059	0,063	272	33	16	17
Papier-, Verlags- und Druckgewerbe	0,171	0,116	0,055	15.325	2.617	1.772	846
Kokerei, Mineralölverarbeitung, H.v. Brutstoffen	1,005	0,714	0,291	3.875	3.892	2.766	1.126
Herstellung von chemischen Erzeugnissen	0,278	0,194	0,084	8.752	2.431	1.697	735
Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	0,114	0,079	0,036	3.252	371	256	116
Glasgewerbe, Herst. von Keramik, Verarb. v.Steinen u.Erden	0,219	0,133	0,086	1.128	247	150	97
Metallerzeugung u.-bearbeitung, Herst. von Metallerzeugnissen	0,114	0,078	0,035	7.900	897	617	280
Maschinenbau	0,090	0,054	0,036	14.719	1.326	797	529
Herstellung von Büromaschinen, DV-Geräte u.-Einrichtungen, Elektrotechnik	0,112	0,073	0,039	15.942	1.787	1.166	620
Fahrzeugbau	0,201	0,144	0,057	26.727	5.369	3.852	1.517
Herstellung von Möbeln, Schmuck, Musikinstr. usw., Recycling	0,119	0,052	0,068	3.589	429	186	243
Energie- und Wasserversorgung	1,653	0,486	1,167	6.154	10.174	2.994	7.180
Baugewerbe	0,050	0,024	0,026	27.654	1.386	663	724
Handel, Instandhaltung u. Reparatur von Kfz u. Gebrauchsgütern	0,080	0,031	0,049	128.363	10.210	3.959	6.251
Gastgewerbe	0,093	0,022	0,070	25.411	2.352	567	1.785
Verkehr und Nachrichtenübermittlung	0,391	0,143	0,249	80.184	31.364	11.432	19.932
Kredit- und Versicherungsgewerbe	0,242	0,036	0,206	47.311	11.472	1.704	9.768
Grundstücks-, Wohnungswesen, Vermietung beweglicher Sachen usw.	1,810	0,134	1,676	172.583	312.340	23.161	289.180
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	0,568	0,022	0,546	31.206	17.724	685	17.039
Erziehung und Unterricht	0,410	0,029	0,381	24.396	10.007	711	9.297
Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	0,171	0,038	0,133	71.903	12.297	2.744	9.554
Erbringung sonstiger öffentlicher u. persönlicher Dienstleistungen	0,555	0,050	0,505	43.984	24.419	2.217	22.201
<b>Insgesamt</b>				<b>771.696</b>	<b>466.754</b>	<b>65.697</b>	<b>401.057</b>

Quellen: Statistisches Bundesamt (2011); Bundesagentur für Arbeit (2011); Berechnungen HWWI.

Da das Starkregenereignis vorwiegend die Innenstadt und umliegende Stadtgebiete getroffen hat, ist anzunehmen, dass hauptsächlich gewerbliche Betriebe des Einzelhandels und des Gaststättengewerbes sowie Bürogebäude durch eindringendes Wasser in Verkaufs- und La-

gerräume sowie Büros betroffen waren. Dies geht auch aus den zu diesem Ereignis erschienen Zeitungsartikeln und Berichten hervor.

Nimmt man an, dass 1 % der Betriebe im Wirtschaftszweig Handel (192 Betriebe<sup>7</sup>) von dem Ereignis betroffen sind und zugleich 1 % des Bruttoanlagevermögens des Wirtschaftszweiges innehaben, dann ergibt sich für diese ein Bruttoanlagevermögen von insgesamt 102 Mio. Euro. Bei einem Wasserstand von 20 cm ergibt sich unter Anwendung der relativen Schadensfunktion eine Schadensrate von 12 % ( $27 * \sqrt{0,2} = 12$ ) und damit ein Gesamtschaden von 12,2 Mio. Euro. Entsprechende Berechnungen für das Gastgewerbe ergeben einen Schaden in Höhe von 2,8 Mio. Euro für jeweils 1 % der Betriebe dieses Wirtschaftszweiges (57 Betriebe).

Für die Betriebe der Energie- und Wasserversorgung ergibt sich unter Anwendung der relativen Schadensfunktion eine Schadensrate von 2,7 %. ( $6 * \sqrt{0,2} = 2,7$ ) Unter der Annahme, dass wiederum 1 % des Betriebsvermögens (4 Betriebe) von dem Starkregenereignis betroffen ist, ergibt sich ein Gesamtschaden von 2,7 Mio. Euro.

### ***Indirekte Kosten***

#### ***Produktionsverluste***

Die Produktionsverluste können zum einen aus einzelbetrieblicher Sicht in Form von entgangenem Umsatz, zum anderen aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive mit Hilfe der Bruttowertschöpfung betrachtet werden.

Es wird die Annahme getroffen, dass eine örtliche Einheit eines Unternehmens im Gastgewerbe pro Tag einen Umsatz von 720 Euro erwirtschaftet. Dies entspricht dem bundesweiten Durchschnitt im Wirtschaftszweig Gastgewerbe für das Jahr 2009.<sup>8</sup> Unterstellt man dann, dass 1 % der Hamburger Betriebe dieser Branche (57 Betriebe) von dem Unwetter betroffen waren und ihren Betrieb für durchschnittlich einen Tag schließen mussten, ergeben sich Umsatzeinbußen von insgesamt 40.800 Euro. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive entspricht

---

<sup>7</sup> Quelle für die Berechnungen: Statistisches Amt des Bundes und der Länder (2012).

<sup>8</sup> Zur Berechnung wurden die Daten der Handelsstatistik des Statistischen Bundesamtes herangezogen (Statistisches Bundesamt 2012).

dies einem Bruttowertschöpfungsverlust von 20.300 Euro. Dabei wurde eine Bruttowertschöpfung je örtlicher Einheit von 360 Euro pro Tag zu Grunde gelegt.<sup>9</sup>

Durch entsprechendes Vorgehen für den Einzelhandel ergibt sich für eine örtliche Einheit in dieser Branche ein durchschnittlicher Umsatz pro Tag von 2.700 Euro und eine Bruttowertschöpfung pro Tag von 550 Euro. Geht man wiederum davon aus, dass es in 1 % der Einzelhandelsbetriebe in Hamburg (192 Betriebe) aufgrund von Wasserschäden für durchschnittlich einen Tag zu Betriebsschließungen kam, dann ergeben sich für diese Betriebe insgesamt Umsatzeinbußen von 522.000 Euro. Für die Stadt Hamburg bedeutet dies Bruttowertschöpfungsverluste in Höhe von 105.600 Euro.

**Tabelle 2: Zusammenstellung der Richtwerte für die Schadenskosten**

Schadenskategorie	Einheit	Schäden	Quelle
<b>öffentlich</b>			
Gebäude	1 Gebäude	11.202 € (Wassertiefe ≤ 0,5 m) 50.411 € (Wassertiefe > 0,5 m)	Faber et al. 2005
	1 m <sup>2</sup>	106 € (Wassertiefe ≤ 0,5 m) 588 € (Wassertiefe > 0,5 m)	
Schienen/Straße/Tunnel/ Unterführung unter Wasser	30 Objekte	114.000 €	Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer 2008
Straße	1 m <sup>2</sup>	2,56 €	Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004
Weg	1 m <sup>2</sup>	1,28 €	Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004
Brücke	1 Brücke	7,65 €	Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004
<b>privat</b>			
Wohngebäude - Keller	1 Keller	9.400 - 28.000 € (Wassertiefe 0,2 m)	XtremRisk
Gewerbe	% des Vermögens	$Y = 27 \cdot \sqrt{x}$	Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004
Energie- und Wasserversorgung	% des Vermögens	$Y = 6 \cdot \sqrt{x}$	Emschergenossenschaft Lippe Verband 2004

#### 5.4.2 *Schadenskalkulation*

Aus den vorhandenen Daten für das Starkregenereignis in Hamburg kann im Folgenden nur eine grobe Schätzung der entstandenen Schäden abgegeben werden. Tabelle 3 zeigt die Kategorien, für die eine Schadenskalkulation möglich war und gibt die zu Grunde gelegten An-

<sup>9</sup> Für Hotels, Gasthöfe und Pensionen ist die durchschnittliche Bruttowertschöpfung pro Tag 660 Euro, während dieser Wert für Gastronomiebetriebe 290 Euro beträgt.

nahmen sowie die geschätzten Schadenskosten wieder. Insgesamt ergeben sich Kosten in Höhe von 27,4 bis 46,1 Mio. Euro. Ein Großteil der Schäden entfällt auf private Vermögensgegenstände und der bei Weitem geringere Anteil entfällt auf öffentliche Einrichtungen. Die Frage, wer für die Schadenkosten aufkommen muss, lässt sich an dieser Stelle nicht beantworten. Aus vergleichbaren Schadensereignissen während großer Flussüberschwemmungen lässt sich ableiten, dass der Anteil der versicherten Schäden zwischen 10 % (während der Oder-Flut im Juli/August 1997) und 40 % (während der Überschwemmung des Mittel- und Niederrheins, dem Main, der Nahe und der nördlichen Donauzuflüsse im Januar/Februar 1995) der volkswirtschaftlichen Schäden betragen kann. So entstand beispielsweise durch das Augusthochwasser 2002 in Deutschland ein Schaden von 9,1 Mrd. Euro, wovon 1,8 Mrd. Euro (20 %) versichert waren (Müller 2003, S. 18-19).

**Tabelle 3: Schadenskalkulation für Hamburg**

Schadenskategorie	Anzahl/ Ausmaß	Kalkulation	Schäden insgesamt
<b>öffentlich</b>			
Gebäude	3	Untergrenze = 11.202 €*3 Obergrenze = 50.411 €*3	33.606 – 151.233 €
Schienen/ Straßen/ Tunnel/ Unterführungen unter Wasser	30		114.000 €
<b>privat</b>			
Wohngebäude - Keller	1.000	9.400 - 28.000 €	9,4 Mio. – 28. Mio. €
Gewerbe und Industrie	194	$Y = 27 \cdot \sqrt{0,2}$	15 Mio. € (Y=12 % des Bruttoanlagevermögens)
Energie- und Wasserversorgung	4	$Y = 6 \cdot \sqrt{0,2}$	2,7 Mio. € (Y=2,7 % des Bruttoanlagevermögens)
<b>Insgesamt (direkt)</b>			<b>27.247.606 – 45.965.233 €</b>
Produktionsverlust Gastgewerbe	57	BWS-Verlust/Tag = 360 €/Tag * 57	20.300 €
Produktionsverlust Einzelhandel	192	BWS-Verlust/Tag = 550 €/Tag * 192	105.600 €
<b>Insgesamt (direkt+indirekt)</b>			<b>27.373.506 – 46.091.133 €</b>

Insgesamt ergeben sich also aus diesen Berechnungen Schäden zwischen 27,3 und 46,1 Mio. Euro. Gemäß der im Projekt URBAS erarbeiteten Methode belief sich der Schaden insgesamt auf nur etwa 11,3 Mio. Euro (persönliche Auskunft von Prof. Dr. Reimund Schwarze, UFZ). Dort machen Schäden durch überflutete Keller mit 10,1 Mio. Euro den größten Anteil aus. Allerdings werden Schäden im unternehmerischen Bereich kaum berücksichtigt, so dass sie die Differenz im Gesamtergebnis erklären. Ferner wird hier bewusst eine andere Spanne

für Kellerschäden als im URBAS-Projekt (und auch in der Fallstudie 2) zugrunde gelegt, um den Einfluss der Grundannahmen auf die Ergebnisse zu betonen.

## **5.5 Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Anpassungsmaßnahmen, die der Vermeidung von Schäden durch Starkregenereignisse dienen, können auf staatlicher und auf privater Seite stattfinden. In der Regel wird der einzelne Entscheidungsträger vor ihrer Implementierung die Kosten und Nutzen einer Maßnahme gegeneinander abwägen. Der Nutzen einer Maßnahme stellt sich vor allem in Form von vermiedenen Schäden dar. Gleichzeitig können positive Nebeneffekte auftreten, die die Wahrscheinlichkeit der Durchführung erhöhen. Ein Beispiel wäre der Einbau wasserdichter Fenster, die gleichzeitig zu einer besseren Isolierung und damit geringerem Heizbedarf führen.

Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (2008) weist in dem Fallbeispiel für Hamburg auf technische und nicht-technische Maßnahmen hin, die von staatlicher Seite zur Vermeidung von Schäden unternommen werden können. Die Möglichkeiten bei den nicht-technischen Maßnahmen unterscheiden sich für Siedlungsbereiche und Gebiete außerhalb der geschlossenen Bebauung. In den Siedlungsbereichen können Maßnahmen zur Entsiegelung, zur Regenwasserversickerung und zum Regenwasserrückhalt Schäden an Gebäuden und Infrastruktur deutlich verringern. Außerhalb der Siedlungsbereiche bieten die Schaffung natürlicher Rückhalteflächen und das Aufforsten von Flächen die Möglichkeit zur Abflussminderung. Technische Anpassungsmaßnahmen beziehen sich auf eine Abflussminderung und gleichzeitige Verbesserung der Abflussleistung von Gewässern (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer 2008, S. 22).

Die Stadt Arnsberg (circa 74.300 Einwohner) in Nordrhein-Westfalen bietet ein Beispiel für die Umsetzung eines kombinierten Hochwasserschutzkonzeptes. Aus Erfahrungswerten wurde der Schaden bei einem 100-jährigen Hochwasser auf 15 Mio. Euro geschätzt (Stadt Arnsberg 2010). Es wurde von öffentlicher Seite ein Hochwasserschutzkonzept entwickelt, in dem die Renaturierung kleinerer Gewässer im Stadtgebiet vorgesehen war. Durch die Kombination verschiedener Instrumente konnten vier Bäche (mit einer Gesamtlänge von etwa 2,7 km) renaturiert und drei kleinere Brücken zu Kosten von insgesamt 5,1 Mio. Euro gebaut werden (KomPass Tatenbank 2011). Hier zeigte sich also ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis von circa 1:3. Zu den eingesetzten Instrumenten zählten freiwillige Vereinbarun-

gen, Planungsinstrumente (zum Beispiel Planfeststellungsverfahren), Information und Sensibilisierung der Bevölkerung sowie direkte finanzielle Förderungen, wie Subventionen und Zuwendungen. Die Effektivität dieser Maßnahmen zeigte sich bereits bei einem Starkregenereignis im Jahr 2010, bei dem Schäden weitgehend vermieden werden konnten (KomPass Tatenbank 2011).

Weitere Möglichkeiten der Schadensvermeidung bietet der Einsatz von Schutzsystemen, die greifen, wenn Hochwasser auftritt, und das Wasser aus sensiblen Bereichen fernhalten. Hier können auch mobile Systeme zum Einsatz kommen, die im Extremfall schnell aufgebaut werden können (siehe hierzu auch [www.aquastop.de](http://www.aquastop.de)). Solche Systeme lassen sich sowohl für ganze Gemeinden oder Ortsteile anwenden als auch für einzelne Objekte.

Auch für Privatpersonen ist das Ergreifen von Anpassungsmaßnahmen aus Kosten-Nutzen-Überlegungen oft sinnvoll. In den meisten Fällen ist davon auszugehen, dass kein Versicherungsschutz gegen die Überschwemmungsschäden besteht. Gebäude-, Hausrat- und Inventarversicherungen greifen in der Regel nicht bei Schäden infolge eines Starkregenereignisses. Hierfür müsste eine Elementarschadenversicherung abgeschlossen worden sein, deren Verbreitungsgrad relativ gering ist (Flomm 2011). Auch die Kosten eines Feuerwehreinsatz sind in der Regel vom Hausbesitzer oder Mieter selbst zu tragen. Die Schadenshöhe hängt oft auch davon ab, wie Öltanks gesichert werden. Aufgeschwemmte Tanks haben beim "Pfingsthochwasser" 1999 in Neustadt an der Donau den Schaden vervierfacht. Eine einfache Maßnahme, mit der der Schaden bei Hochwasser begrenzt werden kann, ist das Verlegen sensibler Anlagen wie Elektrikanschlüssen und Heizungen vom Keller in höher gelegene Etagen (Schwarze und Wagner 2002). Weiterhin kann die Installation von Rückstauklappen oder ähnlichen Sicherungsmethoden bei Abläufen vor dem Eindringen von rückgestautem und möglicherweise kontaminiertem Wasser aus der Kanalisation in das Wohn- oder Betriebsgebäude schützen.

Einen umfassenden Überblick über Möglichkeiten, ein Wohngebäude vor Starkregenfolgen zu schützen und eine Abschätzung der Kosten für Anpassungsmaßnahmen bietet eine Broschüre, die von HAMBURG WASSER, der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt und dem Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (2007) herausgegeben wurde und derzeit noch einmal überarbeitet wird. Die Kosten, um ein Einfamilienhaus mit rückstausicheren Abwasserleitungen auszustatten, werden beispielsweise auf 1.500 bis 2.500 Euro geschätzt (S. 34). Weitere Beispiele finden sich in Tabelle 4.

Angepasstes Verhalten kann ebenfalls zur Reduzierung der Schäden beitragen. Eine entsprechende Nutzung der Kellerräume bietet bereits im Vorfeld ein geringeres Schadenspotential. Im Extremfall sollten dann gesundheits-, wasser- und umweltgefährdende Stoffe an einen sicheren Ort gebracht werden und alle Personen eines Haushalts sollten über den Standort von Hauptschaltern und Absperrvorrichtungen für Wasser, Strom, Heizung, Gas und Öl informiert sein (HAMBURG WASSER, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt und Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer 2007, S. 35).

**Tabelle 4: Kosten von Anpassungsmaßnahmen**

Anpassungsmaßnahme	Kosten	Verhindert...	Quelle
Rückstausichere Abflussleistungen (Einfamilienhaus)	1.500 – 2.500 €	...Einfluss von rückgestautem Wasser in Keller- und Wohnräume	HAMBURG WASSER, BSU, LSBG (2007)
Fensterklappen	300 – 500 € (ohne Montage, 1,00 x 0,50 m)	...Wassereintritt durch Fenster in Keller- und Wohnräume	HAMBURG WASSER, BSU, LSBG (2007)
Barriersysteme	500 – 1.500 €/m <sup>2</sup> Balckenfläche	...Wassereintritt auf das Grundstück	HAMBURG WASSER, BSU, LSBG (2007)
Dränanlage (Neubau)	4.000 – 8.000 €/100m <sup>2</sup> Kellergrundfläche	...Eintritt von Sickerwasser in die Kellerwände (Durchnässung, Schimmelbildung)	HAMBURG WASSER, BSU, LSBG (2007)
Dränanlage (Neubau)	1.000 – 1.500 € pro laufenden Meter Kelleraußenwand	...Eintritt von Sickerwasser in die Kellerwände (Durchnässung, Schimmelbildung)	HAMBURG WASSER, BSU, LSBG (2007)

## 5.6 Fazit und Handlungsempfehlungen

Das Starkregenereignis am 06. Juni 2011 hat in weiten Teilen Hamburgs zu starken Überflutungen geführt. Auf Grundlage von Zeitungsberichten, persönlichen Gesprächen und Einsatzberichten der Freiwilligen Feuerwehren konnten der Ereignisverlauf und die eingetretenen Schäden ansatzweise rekonstruiert werden.

Die Einteilung in Schadenskategorien erlaubt ein systematisches Vorgehen in der Erfassung und Bewertung der Schäden. Darüber hinaus ist damit eine Übertragbarkeit auf andere Ereignisse gegeben. Zur Bewertung der Schäden wurde versucht, auf Ansätze zurückzugreifen, die in der Literatur bereits Anwendung gefunden haben, was für viele der untersuchten Schadenskategorien möglich war. Somit soll dazu beigetragen werden, bestehende Schätzmethoden zu etablieren und gleichzeitig methodische Lücken zu füllen.

Die Bandbreite der Schätzung für die durch das Starkregenereignis im Juni 2011 in Hamburg verursachten direkten Schäden liegt zwischen 27,4 und 46,1 Mio. Euro. Ein Großteil der

Schäden entstand im privaten Bereich durch vollgelaufene Keller- und Geschäftsräume. Durch Produktionseinbußen, die infolge des Ereignisses durch kurzfristige Betriebsschließungen im Gastgewerbe und Einzelhandel vermutlich eingetreten sind, ergaben sich indirekte Kosten in Höhe von 125.900 Euro.

Die vorliegenden Ergebnisse können allerdings nur eine grobe Abschätzung der entstandenen Schäden wiedergeben. Aufgrund der sehr lückenhaften Datenlage, mussten im Verlauf der Fallstudie viele Annahmen getroffen werden, die im Detail nicht der Realität entsprechen dürften. Einzelne Schadenskategorien, zu denen zu wenige Informationen vorlagen, wie beispielsweise Schäden in Büroräumen, mussten gänzlich aus der Schätzung ausgeschlossen werden. Die angegebene Bandbreite der Schadenshöhe soll dieser Unsicherheit Rechnung tragen.

Die Differenzierung der Schäden zeigt, dass eine Anpassung an mutmaßlich häufigere und stärkere Extremereignisse sowohl für öffentliche als auch private Akteure wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Folglich sind hiervon nicht nur die Einsatzkräfte in der Vorplanung oder bei Eintreten eines Schadensereignisses gefragt. Zugleich wirft dies die Frage auf, von wem (bei unterbliebener Anpassung) die Kosten einer Schadensbeseitigung zu tragen sind (zum Beispiel wer sollte für das Auspumpen eines Kellers zahlen?).

Die Anpassungsmaßnahmen zur Vermeidung solcher Schäden können sich zum einen auf Entsiegelung von Flächen oder die Renaturierung von Wasserläufen beziehen. Zum anderen können die in einem Risikogebiet befindlichen Objekte gezielt vor Überflutungen geschützt werden. Auch hier zeigt sich eine große Spannweite der Kosten für entsprechende Anpassungsmaßnahmen. Es müsste daher im Einzelfall unter Abwägung der Kosten und Nutzen entschieden werden, ob die Durchführung einer Anpassungsmaßnahme sinnvoll ist.

Generell lässt sich zu der Fallstudie anmerken, dass die lückenhafte und dezentrale Datenbasis die Bearbeitung erschwert hat. Die Abschätzung der entstandenen Schäden musste daher auf Grundlage von Aussagen in Zeitungsartikeln und persönlichen Gesprächen erarbeitet werden.

Um also konkrete Handlungsempfehlungen für private und öffentliche Akteure geben zu können, wäre zunächst eine zentrale Erfassung von Schäden und Informationen zu Extremwetterereignissen notwendig. Des Weiteren wäre hierbei eine Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Standard- und Extremwetterereignis wünschenswert, so dass eine Analyse im Zeitablauf möglich ist.

## 5.7 Fallstudienliteratur

- Behörde für Inneres und Sport (2011): Starkregen über Hamburg – Stadt Hamburg. Pressemitteilung am 07.06.2011. Online verfügbar unter:  
<http://www.hamburg.de/feuerwehr/2925646/starkregen-06-06-2011.html?print=true> (Download am 04.05.2012)
- Blaulich (2011): Unwetter in Hamburg – Wassereinbruch im Hauptbahnhof. Redaktion Blaulicht. Online verfügbar unter: <http://redaktion-blaulich.de/?p=1175> (Download am 09.05.2012)
- Brasseur, G., P. von Flotow (Hrsg.) (2010): Klimafolgenforschung zur Beurteilung der Auswirkungen von konvektiven Extremwetterereignissen auf die Schadenlast in Deutschland. Bericht auf der Grundlage eines Workshops veranstaltet durch das Climate Service Center (CSC) in Kooperation mit dem Sustainable Business Institute (SBI) e.V., 14/15. Januar 2010, Climate Service Center, Hamburg. Online verfügbar unter:  
[http://www.hzg.de/imperia/md/content/csc/workshopdokumente/extremwetterereignisse/workshopbericht\\_extremwetterereignisse-final.pdf](http://www.hzg.de/imperia/md/content/csc/workshopdokumente/extremwetterereignisse/workshopbericht_extremwetterereignisse-final.pdf) (Download am 15.05.2012)
- Deutscher Wetterdienst (ohne Jahr): Kriterien für Wetterwarnungen des DWD, online verfügbar unter: <http://www.wettergefahren.de/warnungen/wetterwarnkriterien.html> (Download am 23.04.2012)
- Emschergenossenschaft Lippe Verband (2004): Hochwasseraktionsplan Emscher – Methodik und Schadensermittlung. Online verfügbar unter:  
<http://www.eglv.de/wasserportal/flussgebietsmanagement/hochwasserschutz/hochwasseraktionsplan-emscher/methodik-schadensermittlung.html> (Download am 04.05.2012)
- Faber, R., K. Lerach, H. P. Nachtnebel (2005): Flussraum Agenda – Risikoanalyse des bestehenden Hochwasserschutzes Stadt Gleisdorf und Umgebung, Arbeitspaket: Ist Zustand und Analyse, Wien. Online verfügbar unter: [http://iwhw.boku.ac.at/FABER/Endbericht/Endbericht\\_V26.pdf](http://iwhw.boku.ac.at/FABER/Endbericht/Endbericht_V26.pdf) (Download am 04.05.2012)
- Flomm, T. (2011): Überschwemmungen. In: Hamburger Grundeigentum Nr. 7/2011, S. 25-26.
- Focus Online (2011): Unwetter: Ausnahmezustand in Hamburg. Nachrichten am 06.06.2011. Online verfügbar unter: [http://www.focus.de/panorama/welt/unwetter-ausnahmezustand-in-hamburg\\_aid\\_634633.html](http://www.focus.de/panorama/welt/unwetter-ausnahmezustand-in-hamburg_aid_634633.html) (Download am 04.05.2012)
- Freiwillige Feuerwehr Wellingsbüttel (ohne Jahr): Einsätze 2011. Online verfügbar unter: 2011  
<http://www.ff-wellingsbuettel.de/einsatz-ind.htm> (Download am 03.05.2012)
- HAMBURG WASSER, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer (2007): Wie schütze ich mein Haus vor Starkregenfolgen? Ein Leitfaden für Hauseigentümer, Bauherren und Planer. Hamburg. Online verfügbar unter:  
<http://www.hamburg.de/contentblob/135098/data/faltblatt-starkregenfolgen.pdf> – *wird derzeit überarbeitet*
- Hamburger Abendblatt (2011a): Mühlenkamp unter Wasser, Chaos in der Innenstadt. Artikel 1914730. Online verfügbar unter:  
<http://www.abendblatt.de/hamburg/article1914730/Muehlenkamp-unter-Wasser-Chaos-in-der-Innenstadt.html> (Download am 04.05.2012)
- Hamburger Abendblatt (2011b): Unwetter-Bilanz: 80 Liter Regen pro Quadratmeter. Artikel 1916580. Online verfügbar unter: <http://www.abendblatt.de/hamburg/article1916580/Unwetter-Bilanz-80-Liter-Regen-pro-Quadratmeter.html> (Download am 09.05.2012)
- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press,

- Cambridge, UK, and New York, NY, USA. Online verfügbar unter: [http://ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All\\_FINAL.pdf](http://ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf) (Download am 18.05.2012)
- KLIMZUG-Nord (2011): Newsletter 2/2011. Online verfügbar unter: [http://www.klimzug.de/\\_media/vdo\\_KLIMZUG\\_Newsletter\\_2\\_2011\\_web.pdf](http://www.klimzug.de/_media/vdo_KLIMZUG_Newsletter_2_2011_web.pdf) (Download am 09.05.2012).
- KomPass Tatenbank (2011): Maßnahmen zur Klimaanpassung an kleineren Gewässern in Arnsberg. Online verfügbar unter: [http://www.tatenbank.anpassung.net/SiteGlobals/Functions/Massnahmen/MeasureDetails.html?backLink=Tatenbank%2FDE%2FService%2FSuche%2FMassnahmenSuche\\_Formular.html&measureId=1942](http://www.tatenbank.anpassung.net/SiteGlobals/Functions/Massnahmen/MeasureDetails.html?backLink=Tatenbank%2FDE%2FService%2FSuche%2FMassnahmenSuche_Formular.html&measureId=1942) (Download am 16.05.12)
- Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer (2008): Fallstudie Hamburg, Teil A: Analyse, F+E Vorhaben: Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS) im Rahmen des Förderprogramms des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RI-MAX), Aachen.
- Müller, M., H. Kreibich (2005): Private Vorsorgemaßnahmen können Hochwasserschäden reduzieren, in: Schadenprisma Nr. 1/2005, S. 4-11.
- Müller, M. (2003): Überschwemmungen in Deutschland – Ereignistypen und Schadenbilder, in: Schadenprisma Nr. 2/2003, S. 18-23
- NDR (2011): Starkregen setzt Hamburg unter Wasser. Online verfügbar unter: <http://www.ndr.de/regional/unwetter287.html>.
- Schwarze, R., G. G. Wagner (2002): Hochwasserkatastrophe in Deutschland: Über Soforthilfen hinausdenken. In: Wochenbericht des DIW Berlin 35/02. Online verfügbar unter: <http://www.diw.de/sixcms/detail.php/285949#FN9> (Download am 10.05.2012)
- Stadt Arnsberg (2010): Bürgerinformation Hochwasser. Arnsberg. Online verfügbar unter: [http://www.arnsberg.de/umwelt/wasser/Buergerinfo\\_Hochwasser\\_042008.pdf](http://www.arnsberg.de/umwelt/wasser/Buergerinfo_Hochwasser_042008.pdf) (Download am 14.05.2012)
- Statistisches Amt des Bundes und der Länder (2012): Unternehmensregister-System 95 (URS 95), aktive Betriebe nach Wirtschaftsabschnitten 2009. Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de> (Download am 11.05.2012)
- Statistisches Bundesamt (2011): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des Bundes – Bruttoanlagevermögen: Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche, Anlagearten. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2012): Unternehmen, Beschäftigte, Umsatz und weitere betriebs- und volkswirtschaftliche Kennzahlen im Handel: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige - Jahresstatistik im Handel. Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de> (Download am 11.05.2012)
- Technisches Hilfswerk Hamburg-Nord (2011): Einsätze nach Starkregen. Einsatzbericht THW Hamburg-Nord 060611. Online verfügbar unter: <http://www.thw-hamburg-nord.de/einsatz/060611/bericht.htm> (Download am 04.05.2012)

## 6 Zusammenfassung

Im Gesamtzusammenhang des vorliegenden Gutachtens besteht das Ziel von „Los 2: Fallstudien“ darin, nach Absprache mit interessierten Behörden Fallstudien zu konkreten Anpassungsmaßnahmen zu erstellen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erweist es sich in vielen Handlungsfeldern allerdings als schwierig, Maßnahmen konkret zu benennen, was die Auswahl an denkbaren Fallstudien merklich einschränkte. In manchen Bereichen kommt hinzu, dass sich Schäden und mithin potentielle Klimafolgen partiell im Sinne von einzelwirtschaftlichem Kalkül vermeiden lassen. Obwohl die Analysen also bereits auf recht disaggregiertem Niveau durchgeführt wurden, bedürfen individuelle Entscheidungen, und damit auch diejenigen für konkrete Maßnahmen im staatlichen Tätigkeitsbereich, stets einer weitergehenden Einzelfallprüfung.

Die Ergebnisse der einzelnen Fallstudien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### 1. Handlungsfeld Wasserwirtschaft: Steigende Grundwasserstände

Die Anpassungsmaßnahme „Einrichtung einer gebietsbezogenen Grundwasserregulierung“ wurde für den Stadtteil Fuhlsbüttel durchgeführt, wo bereits heute in niederschlagsreichen Perioden ein hoher Grundwasserstand und daraus folgende Kellervernässungen stattfinden. Die zugängliche Datenbasis für die Kosten einer Grundwasserregulierungsanlage ist sehr schwach, so dass hier nur grob geschätzt werden kann, dass die Investitionskosten in dem Bereich eines einstelligen Millionenbetrags liegen würden. Weiterhin fallen jährliche Kosten für Strom und Opportunitätskosten beziehungsweise Pachtkosten für das genutzte Grundstück an. Die Summen hierfür sind sehr stark abhängig von Nutzungsmöglichkeiten und Besitzverhältnissen der Fläche.

Die Nutzenschätzung liegt in der Höhe von 3,3 bis 9,0 Mio. Euro pro Jahr (ab 2036). Darin gehen zwei Nutzenkomponenten ein. Vermiedene Schäden an Wohngebäuden könnten zwischen 3,1 und 8,7 Mio. Euro jährlich (ab 2036) liegen, für vermiedene Zeitverzögerungen bei der Zufahrt zum Flughafen wurde eine Summe von 200.000 bis 229.000 Euro pro Jahr berechnet.

Die Nutzen scheinen hier deutlich über den Kosten zu liegen, so dass unter Beachtung der getätigten Annahmen aus ökonomischer Sicht eine Empfehlung für die Durchführung der Maßnahme ausgesprochen werden kann.

## 2. Handlungsfeld Bauen: Grüne Dächer für Hamburg

Für eine Fläche zwischen 53,6 und 113,3 km<sup>2</sup> begrünter Dächer ergibt sich nach unseren Berechnungen ein Gesamtnutzen zwischen 183 und 2.108 Mio. Euro (bis 2100, diskontiert auf 2012). Als wesentliche Nutzenkomponenten gehen vermiedene Sterbefälle durch klimawandelbedingte zusätzliche Hitzetage, vermiedene Krankenhauskosten an zusätzlichen Sommer- und Hitzetagen und nicht benötigte CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate durch eine bessere Effizienz von Photovoltaikanlagen ein.

Die auf der anderen Seite berechneten Kosten betragen zwischen 44 und 1.990 Mio. Euro für den Zeitraum bis 2100 (diskontiert auf 2012) und bestehen zu einem großen Teil aus den zusätzlichen Wartungskosten. Gegebenenfalls ergeben sich hier zusätzlich geringe Kosten für öffentliche Anreizinstrumente oder Informationskampagnen zur Steigerung der Akzeptanz und der Bekanntheit von grünen Dächern.

Eine klare Handlungsempfehlung lässt sich infolge der großen Ergebnisintervalle nicht aussprechen.

## 3. Handlungsfeld Landwirtschaft: Angepasste Sortenwahl

Die auf 2012 diskontierten Kosten einer angepassten Sortenwahl im Apfelanbau im Zeitraum von 2012 bis 2100 betragen laut angestellten Berechnungen zwischen 16,5 und 33 Mio. Euro. Hierbei wurden nur entgangene Einnahmen berücksichtigt.

Als Nutzen wurden drei Komponenten berechnet: Zum ersten die vermiedenen Schäden aufgrund von klimatischen Schadensereignissen wie Trockenheit, die abhängig von den verwendeten Methoden zwischen 4,6 und 24 Mio. Euro liegen. Zum zweiten vermiedene Schäden durch Schädlinge, die gemäß grober Abschätzung einen Wert von 4,3 Mio. Euro ergaben. Und zum dritten der vermiedene Schaden durch Dormanz, der auf 2,9 Mio. Euro geschätzt wurde.

Es zeigt sich, dass eine Umstellung der Sorten sinnvoll sein kann, allerdings sollte sie wahrscheinlich nicht verfrüht erfolgen.

## 4. Handlungsfeld Katastrophenschutz: Der Starkregen im Juni 2011

Die gesamten Schäden des Ereignisses wurden auf 27,3 bis 46,1 Mio. Euro geschätzt. Die betreffenden Individualschäden lagen weit überwiegend im privaten Bereich und dort vermutlich vorwiegend bei den Haushalten (zwischen 9,4 und 28 Mio. Euro). Tendenziell überwiegen die Kosten eines Schadensfalles dort die Kosten einer Anpassungsmaßnah-

me. Allerdings muss daraus nicht zwingend folgen, dass diese Maßnahme zu ergreifen ist, wenn die Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Schadens nur hinreichend klein ist. Ähnliche Überlegungen gelten im Bereich Industrie und Gewerbe (geschätzte Schäden von 15 Mio. Euro) sowie in der Energie- und Wasserversorgung (geschätzte Schäden von 2,7 Mio. Euro). Die Analyse hat allerdings eindeutig gezeigt, dass indirekte Schäden bei einem Ereignis dieser Art relativ ebenso zu vernachlässigen sind wie diejenigen an öffentlichen Einrichtungen. Ein Anpassungsbedarf und das Tragen der damit verbundenen Kosten dürften damit sowohl aktuell als auch künftig vor allem im privaten Bereich liegen.

Im Laufe der Arbeiten zeigten sich einige bekannte Schwierigkeiten derartiger Untersuchungen. Einige wichtige kritische Punkte sind die folgenden:

- Die Kosten-Nutzen-Analysen liefern eine große Spannbreite an Ergebnissen, sowohl auf der Kosten- als auch auf der Nutzenseite, obwohl die Untersuchungen hier auf lokaler Ebene stattfanden. Die für Entscheidungen, seien sie politisch oder investiv, erwünschten punktgenauen Informationen können nur in Ausnahmefällen errechnet werden. Dies liegt daran, dass an vielen Stellen mit Annahmen operiert werden muss, die zwar gut zu begründen sind, aber die Resultate merklich beeinflussen können. Aus Transparenzgründen wurden die Ergebnisse deshalb meist als Intervall ausgewiesen.
- Annahmen bei der Berechnung von Kosten und Nutzen bedingen normalerweise Sensitivitätsanalysen. Diese konnten hier nicht unternommen werden, stellen aber ein sinnvolles ergänzendes Instrument in der Entscheidungsfindung dar.
- Viele Aspekte sowohl auf der Kosten- als auch auf der Nutzenseite der Analyse sind mit Unsicherheiten versehen, weil sie (weit) in der Zukunft liegende Umstände erfassen. Darunter fallen unter anderem die verwendeten Klimaszenarien und die tatsächlichen Konsequenzen des Klimawandels, aber auch unsichere Verkaufspreise und Wertentwicklungen von Produkten. Diese Unsicherheiten lassen sich weder ganz ausschließen noch taugen sie als Begründung gegen Kosten-Nutzen-Betrachtungen. Gleichwohl muss man sich ihrer bewusst sein.
- Vor allem auf der Nutzenseite war es nicht möglich alle auftretenden Aspekte in die Bewertung einzubeziehen, unter anderem weil eine Monetarisierung nicht möglich war

oder die Datenbasis dafür nicht vorhanden ist. Hierzu zählen zum Beispiel die Schäden an Kulturgütern.

- Die Fallstudien wurden ausschließlich als Kosten-Nutzen-Analysen angelegt und durchgeführt. Weiterführende oder vertiefte Analyseraster, wie zum Beispiel im Rahmen von Multi-Kriterien-Analysen, konnten nicht angewendet werden. Diese Diskussion soll im abschließenden Los 3 des Gutachtens noch vertieft werden.

Abschließend sei ein letzter Aspekt hervorgehoben: Obwohl die Kooperationsbereitschaft aller angesprochenen Akteure sowohl aus dem Behörden- als auch aus dem privaten Bereich sehr hoch war, traten immer wieder Probleme auf, bestimmte Informationen oder Daten zu beschaffen. Entweder lagen diese gar nicht vor oder wurden nicht zentral oder systematisch erfasst. Sowohl für ein Klimafolgenmonitoring als auch für die künftige systematische Beurteilung von Anpassungsmaßnahmen besteht hier Nachholbedarf.



Hamburgisches  
WeltWirtschafts  
Institut



## Los 3: Empfehlungen

Max Grünig, Julia Kowalewski, Sven Schulze, Jenny Tröltzsch

30. Juli 2012

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	161
2	Grundsätzliche Überlegungen.....	162
2.1	Anpassungserfordernisse .....	162
2.2	Herausforderungen in der Klimaanpassung.....	163
2.3	Umsetzung von Anpassungsaktivitäten via Strategien, Instrumenten und Maßnahmen .....	166
3	Methoden der Maßnahmenbewertung und -auswahl .....	168
3.1	Ausgewählte Bewertungsmethoden für Anpassungsmaßnahmen .....	168
3.1.1	Kosten-Nutzen-Analysen .....	168
3.1.2	Multikriterien-Analyse .....	175
3.1.3	Sonstige .....	180
3.2	Priorisierung von Handlungsfeldern und Maßnahmen .....	180
3.3	Entscheidungsunterstützungstools .....	185
4	Empfehlungen für die Anpassungsstrategie der Stadt Hamburg .....	187
4.1	Allgemeine Handlungsempfehlungen .....	187
4.2	Empfehlungen für einzelne Handlungsfelder .....	187
4.2.1	Küsten- und Hochwasserschutz .....	187
4.2.2	Wasserwirtschaft.....	189
4.2.3	Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz .....	190
4.2.4	Wirtschaft, Energie und Tourismus.....	192
4.2.5	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur.....	195
4.2.5.1	Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen.....	195
4.2.5.2	Infrastruktur .....	196
4.2.6	Menschliche Gesundheit.....	197
4.2.7	Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst.....	198
4.3	Ausblick .....	200
	Quellenverzeichnis .....	201

## **1 Einleitung**

Die Texte und Analysen in den beiden ersten Losen des Gesamtgutachtens haben die Komplexität der Anpassung an den Klimawandel im ökonomischen Kontext aufgezeigt. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Wissenschaft zwar Entscheidungshilfen und -grundlagen ableiten kann. Jedoch bleiben die Entschlüsse über Anpassungsstrategien und konkrete Maßnahmen letztlich Sache der politischen Entscheidungsträger und der öffentlichen Verwaltung. In diesem Sinne sprechen wir im Folgenden keine konkreten Handlungs- oder Maßnahmenempfehlungen aus, sondern konzentrieren uns auf grundsätzliche Hinweise zur optimalen Gestaltung der Anpassung an den Klimawandel, zu Vorgehensweisen, Strategieentwürfen und -inhalten, sowie auf nach derzeitigem Wissensstand zweckmäßige Maßnahmen in den einzelnen Handlungsfeldern, die im Orientierungsrahmen für die Stadt Hamburg von Daschkeit und Renken (2009) formuliert wurden.

## 2 Grundsätzliche Überlegungen

### 2.1 Anpassungserfordernisse

Aus heutiger Perspektive ist eine Anpassung an den Klimawandel aus zwei Gründen notwendig. Erstens sind bereits heute Folgen von Klimaänderungen spürbar und zweitens liegt eine Reihe von Klimaszenarien vor, die für die Zukunft auf einen weiteren (verstärkten) Klimawandel hindeuten. Die Wirkungsrichtung der Veränderungen ist dabei eindeutig, allerdings unterliegt ihr Ausmaß Unsicherheiten.

Anpassung im Sinne einer Begrenzung von negativen Effekten und einer Ausnutzung von Chancen des Klimawandels muss sowohl im Hinblick auf allmähliche Veränderungen des Klimasystems sowie auf häufigere und stärkere Extremereignisse stattfinden. Bei der Anpassungsplanung sollten die unterschiedlichen Anforderungen gradueller Veränderungen gegenüber Wetterextremen berücksichtigt werden.

Der Klimawandel betrifft viele Sektoren und Akteure zugleich, jedoch sind seine Effekte und deren Wahrnehmung höchst unterschiedlich. Insofern ist Anpassung an den Klimawandel auch eine Versicherung gegen eine unsichere Zukunft von Akteuren mit und ohne Risikobewusstsein für künftige Veränderungen. Folglich sind die zentralen Fragen der Anpassung das „Wann?“ und das „Wie viel?“. Dies schließt allerdings eine Nicht-Anpassung mit ein, wenn diese nach einer Bewertung als vorteilhaft anzusehen ist. Dabei können aber einzel- und gesamtwirtschaftliche Kalküle zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen.

Nach herrschender Meinung dürften Anpassungsmaßnahmen vornehmlich privat beziehungsweise autonom durchgeführt werden. Anpassungsmaßnahmen unter staatlicher Regie sind demnach auf bestimmte Bereiche in öffentlicher Verantwortung beschränkt (siehe dazu auch den folgenden Abschnitt). Zugleich kommt jedoch der öffentlichen Hand eine wichtige koordinierende, Rahmen setzende, informierende und Anreiz schaffende Aufgabe zu.

Ein Rückgriff auf das Konzept der Vulnerabilität (Verletzlichkeit) gegenüber dem Klimawandel unterstreicht diese Überlegung. Nach herrschender Meinung ist Vulnerabilität eine Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität. Exposition und Sensitivität ergeben zusammen das sogenannte Störsignal, das hier in den Klimafolgen besteht. Die Anpassungskapazität beschreibt die Fähigkeit, den Folgen des Klimawandels zu begegnen. Hier dürfte ein wesentlicher Ansatzpunkt staatlichen Handelns liegen, indem nicht nur die öffentliche sondern auch die private Anpassungskapazität erhöht wird.

## 2.2 Herausforderungen in der Klimaanpassung

Die stetig wachsende Literatur zur Anpassungsforschung verdeutlicht die hohe Komplexität des Gesamtproblems. Im Gegensatz zum Klimaschutz gibt es beispielsweise keine eindeutige Zielgröße, an der sich die Anpassung orientieren kann. Zwar zielt Anpassung vor allem auf die Verringerung der Vulnerabilität (Verletzlichkeit) gegenüber Folgen des Klimawandels. Jedoch gibt es kein allgemein anerkanntes Konzept zur Definition oder Messung der Verletzlichkeit. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass sie maßgeblich von regionalen und sektoralen Gegebenheiten abhängt.

Aus diesem Grund sollen im Folgenden nur einige wesentliche allgemeine Eigenschaften herausgestellt werden, die nach aktuellem Forschungsstand eine gute Anpassung an den Klimawandel auszeichnen (siehe dazu ausführlicher auch Los 1 und die dort zitierte Literatur) und gleichzeitig große Herausforderungen an ihre Umsetzung stellen.

### 1) Eindeutige Klärung der staatlichen Rolle

Für die verschiedenen staatlichen Ebenen stellt sich vor allem die Frage, inwieweit Anpassung in ihren Handlungsbereich fällt. Dies muss zwingend vor einer Strategieformulierung und der Maßnahmenplanung beantwortet werden.

Staatliches Eingreifen erscheint gerechtfertigt, wenn Marktversagen vorliegt, private Anpassung infolge von anderen Fehlanreizen zu gering ist, hoheitliche Aufgaben, die Daseinsvorsorge oder Ökosysteme elementar berührt sind oder Verteilungsfragen beziehungsweise Finanzierungsrestriktionen beachtet werden sollen. Obgleich diese theoretischen Überlegungen in der Politik- und Verwaltungspraxis kaum genau abzubilden sind, bedingen öffentliche Budgetrestriktionen zumindest eine Einbeziehung dieser Aspekte.

### 2) Zielfestlegung

Naheliegender aber oftmals wenig beachtet ist die Tatsache, dass auch die Anpassung an den Klimawandel mit Zielen verbunden ist, die im Rahmen einer Strategie festgelegt werden sollten. Damit einher geht die Notwendigkeit, diese Ziele laufend zu überprüfen und den Zielerreichungsgrad zu messen, gegebenenfalls aber auch die Ziele neuen Erkenntnissen anzupassen. Anhaltspunkte dafür kann das Indikatorensystem liefern, das derzeit für die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) entwickelt wird (Schönthaler et al. 2011). Anpassung wird in der

Mehrheit der Fälle keinen vollständigen Schutz vor den Wirkungen des Klimawandels bieten können. Insofern können klar formulierte Ziele auch Teil des Erwartungsmanagements sein.

### 3) Angemessener Umgang mit Unsicherheit

Unsicherheit besteht sowohl in Hinblick auf die Folgen des Klimawandels als auch bezüglich der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen und deren Kosten. Unsicherheit ist deshalb zum zentralen Aspekt der Anpassung geworden. Sie bedingt vor allem zweierlei: Erstens ist eine differenzierte Kommunikation möglicher Klimawandelfolgen ebenso notwendig wie eine regelmäßige, lernende Informationspolitik. Lernend bezieht dabei auf eine ständige Berücksichtigung neuen Wissens sowie des Feedbacks von Stakeholdern. Zweitens muss Unsicherheit in der Entscheidungsfindung adressiert werden, darf aber nicht als grundsätzliches Argument gegen eine Anpassung verwendet werden.

Wichtig ist auch ein offensiver Umgang mit Risiken sehr geringer Wahrscheinlichkeit aber hoher Schadenswirkung. Diese Risiken sind oftmals aus reiner Kosten-Nutzen-Betrachtung tragbar, dennoch ethisch nicht gangbar.

### 4) Beachtung der No-Regret-Regel

Anpassung muss sowohl robust gegenüber veränderten Bedingungen als auch gegenüber Fehleinschätzungen künftiger Entwicklungen sein. Zwar sind Abweichungen zwischen tatsächlichen und erwarteten Entwicklungen unvermeidlich. Jedoch sollten Anpassungsmaßnahmen erstens versunkene Kosten und zweitens das Risiko einer erhöhten Verletzlichkeit vermeiden. Deshalb sollte Anpassung zugleich flexibel gegenüber veränderten Rahmenbedingungen und neuem Wissen sein.

Auch sollte vermieden werden, dass temporäre staatliche Anpassungsmaßnahmen, die als Brücke zur privaten Anpassung gedacht waren, dauerhaft aufrechterhalten werden. Freifahrerverhalten und Lock-in-Effekte verhindern eine optimale Anpassung.

Außerdem sollten Anpassungsmaßnahmen möglichst auch im Falle eines sich nicht weiter verändernden Klimas sinnvoll sein, d.h. bereits genug Nutzen aus anderen Nutzenkomponenten erzielen. Dies kann zum Beispiel den Schutz der Artenvielfalt, des kulturellen Erbes oder anderer Ökosystemdienstleistungen umfassen.

## 5) Berücksichtigung von Zeitskalen

Bei der Anpassung kann der Zeitpunkt oder -raum ihrer Durchführung merklich vom Zeitpunkt oder -raum ihrer Wirkung abweichen. Neben dieser Wirkungsverzögerung sind zusätzlich Verzögerungen in der Entscheidungs- und der Umsetzungsphase möglich. Die größere Herausforderung stellt aber die zuerst genannte Wirkungsverzögerung dar, denn daraus folgen erstens Umverteilungswirkungen (zwischen Generationen, aber auch Regionen). Zweitens treten heute Kosten auf, denen erst später – teilweise im Zeitverlauf verteilter und oftmals unsicherer – Nutzen gegenüber steht. Ferner besteht der Zweck der Anpassung gerade darin, dass bestimmte Folgen des Klimawandels vermieden werden. Erfolgreiche Anpassung kann dann im Nachhinein den Eindruck erwecken, dass sie verzichtbar gewesen wäre. Diese Überlegungen sprechen aber nicht gegen eine Anpassung an sich, sondern lediglich für ein planvolles, wohl koordiniertes Vorgehen ohne Aktionismus, sowie für ein Beachten der No-Regret-Regel.

Unter bestimmten Bedingungen ist eine frühzeitige Anpassung zweckmäßig. Dazu gehören vor allem im Zeitablauf konstante oder steigende Anpassungskosten, ein kurzfristig realisierbarer hoher Nutzen, die rechtzeitige Vermeidung irreversibler Schäden, beispielsweise für Ökosysteme, und die Durchführung langfristiger Investitionen, etwa im Gebäude- oder Infrastrukturbereich.

## 6) Mainstreaming

Anpassung an veränderte Wetterbedingungen findet bereits seit Langem statt. Erst die moderne Klimawissenschaft ermöglicht aber einen Blick in die mögliche Klimazukunft. Die heutigen technologischen Möglichkeiten ermöglichen es, Anpassung frühzeitig in Entscheidungsprozesse einzubeziehen. Anpassung sollte mithin nicht separat gedacht werden, sondern Teil aller Entscheidungsprozesse sein. Dieses Mainstreaming kann von relevanten Gesetzgebungsverfahren bis zu öffentlichen Investitionsentscheidungen reichen.

## 7) Berücksichtigung der Art der Klimaänderung

In diesem Zusammenhang ist nicht die Änderung der Durchschnittstemperatur, der Niederschlagsmuster oder Ähnliches gemeint, sondern vielmehr die Unterscheidung zwischen graduellen Änderungen und der erwarteten zunehmenden Häufigkeit und Schwere von Stark-

oder Extremwetterereignissen. Die Anpassung an Extremereignisse ist dabei Aufgabe des Risikomanagements, das künftig verstärkt „Klimaaufschläge“ in Betracht ziehen muss. Die Anpassung an graduelle Veränderungen ist noch schwieriger, weil sie für die menschliche Wahrnehmung fast unbemerkt verlaufen und von kurzfristigen Ereignissen überlagert werden. Dies führt zu besonderen Herausforderungen in der Kommunikation von Klimaanpassung sowohl auf der politischen Ebene als auch gegenüber der Öffentlichkeit. Somit ist die Tatsache, dass bestimmte Veränderungen (noch) nicht spürbar sind, kein stichhaltiger Grund für ein Abwarten. Es ist stets zu prüfen, ob ein sofortiges Handeln günstiger beziehungsweise besser ist als ein Aufschieben des Handelns. Darüber hinaus ist zu beachten, dass Klimaanpassung sich nur sehr selten als eine einmalige Aktion manifestiert. Stattdessen ist sie weit überwiegend ein dynamischer Prozess, der eine Abfolge von verschiedenen Einzelmaßnahmen darstellt sowie ein Lernen und Revidieren mit einschließt.

#### 8) Wissenschaftlichkeit

Die noch relativ junge Anpassungsforschung wurde bereits frühzeitig in nationale und internationale Politikprozesse zum Thema eingebunden. Das zunehmende Interesse an der Fragestellung sollte dazu genutzt werden, künftige Entscheidungen auf der Grundlage wissenschaftlicher Methoden und Erkenntnisse zu fällen. Die wissenschaftliche Fundierung politischer Entscheidungen erhöht ihre Glaubwürdigkeit und verringert die Gefahr kostenintensiver Fehlentscheidungen. Dies erfordert aber sowohl ein Umdenken der Wissenschaften in Richtung einer höheren Anwendungsorientierung und Politikberatung, als auch der Politik und Verwaltung in Richtung einer größeren Offenheit gegenüber wissenschaftlichen Erkenntnissen.

### **2.3 Umsetzung von Anpassungsaktivitäten via Strategien, Instrumenten und Maßnahmen**

Die folgenden Definitionen dienen zur praktischen Orientierung für Politik und Verwaltung, die sich mit der Anpassung an den Klimawandel befassen. Sie erheben keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und geben die Auffassung der Autoren wieder.

## **Anpassungsstrategie**

Eine Anpassungsstrategie gibt den allgemeinen Rahmen für die Klimaanpassung in einer bestimmten Region vor. Bei der Region kann es sich um Staatenverbände, Nationalstaaten oder untergeordnete Gebietseinheiten (Bundesländer, Kreise, Gemeinden) handeln. Eine Anpassungsstrategie beinhaltet die Benennung künftiger regionaler Klimaszenarien, relevanter Sektoren oder Handlungsfelder, ihrer Betroffenheit und weiterer Schritte zur Konkretisierung von Anpassungshandeln zur Erreichung eines vordefinierten Ziels.

In ähnlicher Bedeutung werden meist die Begriffe Anpassungsplan oder Anpassungsprogramm benutzt, wengleich die Autoren der Auffassung sind, dass diese jeweils konkreter sind, indem sie ein Bündel an Anpassungsmaßnahmen, z.B. für einzelne Sektoren, umfassen.

## **Anpassungsinstrument**

Ein Anpassungsinstrument dient dazu, Anreize für privates Anpassungshandeln zu setzen. Insofern kommt es dann zum Einsatz, wenn Marktversagen oder andere Umstände vorliegen, die von staatlicher Seite korrigiert werden sollen. Das Instrument muss dabei nicht originär in dem Sinne sein, dass es alleine zum Zwecke der Klimaanpassung eingeführt wird. Vielmehr können auch bestehende Instrumente abgewandelt oder verstärkt werden. Zu möglichen Instrumenten zählen gemäß gängiger umweltökonomischer Literatur sowohl Ge- und Verbote als auch marktbasierte Lösungen (vor allem Steuern/Subventionen und Zertifikate) sowie informatorische Instrumente (Label etc.).

## **Anpassungsmaßnahme**

Eine Anpassungsmaßnahme ist eine spezifische Aktion vor allem technologischer oder verhaltensbezogener Art, die auf eine Verringerung der Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels abzielt. Sie muss dabei nicht unbedingt ausschließlich der Anpassung dienen, sondern kann eine Anpassungskomponente beinhalten.<sup>10</sup> Gleichzeitig kann eine Maßnahme der Anpassung dienen, ohne ausdrücklich für diesen Zweck konzipiert oder eingeleitet worden zu sein. Dann ist die Anpassungswirkung nur ein Co-Benefit der Maßnahme.<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> Siehe zum Beispiel den Bereich des Küstenschutzes. Dieser würde auch ohne fortschreitenden Klimawandel durchgeführt, muss sich aber heute *zusätzlich* über dessen Folgen Gedanken machen.

<sup>11</sup> Dies ist zum Beispiel potentiell im Naturschutz oder bei Ökosystemen im Allgemeinen der Fall, wo schützenswerte Güter erhalten werden sollen, ihr Schutz aber auch zugleich der Anpassung dienen kann.

### **3 Methoden der Maßnahmenbewertung und -auswahl**

#### **3.1 Ausgewählte Bewertungsmethoden für Anpassungsmaßnahmen**

##### **3.1.1 Kosten-Nutzen-Analysen**

Für die Erarbeitung einer effizienten Anpassungsstrategie stellt die ökonomische Bewertung von Anpassungsmaßnahmen ein zentrales Instrumentarium dar. Eine Bewertung kann anhand verschiedener qualitativer und quantitativer Methoden stattfinden. Nutzen-Kosten-Bewertungen sind als Entscheidungshilfe in politischen Prozessen etabliert. Angewandt werden Nutzen-Kosten-Bewertungen zum Beispiel als Grundlage für Wirtschaftlichkeitsanalysen bei Investitionsentscheidungen der öffentlichen Hand, für die Berechnung des Umweltnutzens von ordnungspolitischen Instrumenten oder zur Wirkungsabschätzung politischer Maßnahmen. Ökonomische Bewertungen eignen sich prinzipiell sowohl für die Entscheidung über die Durchführung einer Maßnahme, eines Instrumentes oder eines Programms, als auch für die Priorisierung der Optionen, d.h. eine Einordnung der Handlungsmöglichkeiten.

Für die Bewertung der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zeigen sich diverse Besonderheiten bzw. Herausforderungen (siehe u.a. Tröltzsch et al. 2012, Altvater et al. 2012, IEEP 2012):

- Abschätzung unter Unsicherheiten des Klimawandels: Das zukünftige Ausmaß des Klimawandels ist nicht bekannt. Unsicherheit besteht auf vielen Stufen der Wirkungskette: über die Menge der zukünftigen Treibhausgasemissionen, das Ausmaß des dadurch ausgelösten Klimawandels, dessen physische Folgen sowie deren ökonomische Auswirkungen.
- Bewertung unter Unsicherheit der Effektivität von Anpassungsmaßnahmen: Es müssen Abschätzungen darüber getroffen werden, in welchem Maße die betreffende Maßnahme die Klimafolge beziehungsweise den Schaden überhaupt mindern kann. Wenn die Kosten einer Anpassungsmaßnahme den Schadenskosten ohne Anpassung gegenübergestellt werden sollen, ist die unterstellte Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen daher ein weiterer wichtiger Faktor bei dem zurzeit meist noch große Unsicherheiten bestehen.
- Abwägung zwischen proaktiver (langfristiger) vs. reaktiver (kurzfristiger) Anpassung: Spätere Anpassung kann die Unsicherheiten hinsichtlich Eignung und Umfang von

Maßnahmen senken, kann aber zu höheren Investitionskosten beziehungsweise höheren Residualschäden führen.

- Bewertung von nicht-marktgängigen Gütern: Eine weitere Herausforderung, die sich jedoch bei allen umfassenden Kosten-Nutzen-Betrachtungen manifestiert, sind die Grenzen der ökonomischen Bewertung im Fall nicht marktgängiger Güter (etwa Schutz der Artenvielfalt), da die Datenbasis hierfür sehr lückenhaft ist. Der nicht-marktgängige Nutzen kann anhand verschiedener Verfahren monetarisiert werden, die jedoch mit Unsicherheiten und methodischen Herausforderungen behaftet sind. Der Nutzen kann entweder über beobachtetes Verhalten oder aber über angegebene Präferenzen ermittelt werden. Letztere können entweder mittels Wertübertrag aus vorhandenen Fallstudien oder aber durch aufwändige Einzelstudien ermittelt werden.
- Überlagerung mit anderen gesellschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Entwicklungen: 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 beispielsweise 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.

Für Anpassungsmaßnahmen sind unter anderem folgende Kosten- und Nutzengrößen relevant:

**Tabelle 1: Kosten und Nutzengrößen**

Kostenabschätzung	Nutzenabschätzung
<p>Direkte Kosten, z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investitionskosten</li> <li>• Laufende (technische) Kosten</li> <li>• Administrative Kosten</li> </ul> <p>Indirekte Kosten, z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opportunitätskosten</li> <li>• Transaktionskosten</li> </ul>	<p>Direkte Nutzen, z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermiedene Schadenskosten (an Gebäuden, Erträgen, Personen, Umwelt)</li> <li>• Vermiedene Wertschöpfungsverluste</li> </ul> <p>Indirekte Nutzen, z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Änderung der Erholungsfunktion, Tourismus</li> <li>• Änderung von Entwicklungspotentialen</li> <li>• Änderung der Artenvielfalt oder anderer Ökosystemleistungen</li> <li>• Wertveränderungen</li> <li>• Wirtschaftlicher Impuls der Investition</li> </ul>

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Dehnhardt et al. (2008), Dyckhoff und Ahn (2002).

Für Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel liegt bisher eine begrenzte Anzahl an Daten zu deren Kosten und Nutzen vor, die im Rahmen von verschiedenen Forschungsvorhaben auf EU-, deutscher und lokaler Ebene gewonnen wurden.

Eine beispielhafte Vorgehensweise für Kosten-Nutzen-Analysen für die Anpassung an den Klimawandel, wie sie in der Studie für die Stadt Hamburg angewandt wurde, kann folgende Schritte enthalten:

**Tabelle 2: Beispielhaftes Vorgehen bei Kosten-Nutzen-Analyse**

Beispielhaftes Vorgehen bei Kosten-Nutzen-Analyse
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erfassen der Kosten- und Nutzenkomponenten</li> <li>2. Datenrecherche zu Kosten und Nutzen</li> <li>3. Bezug der Daten auf Hamburg</li> <li>4. Abschätzung des Anteils der vermeidbaren Schadenskosten und weiterer Nutzenaspekte, der durch die Anpassungsmaßnahme möglich ist (pro Jahr)</li> <li>5. Berechnung des Gegenwartswertes der Kosten und Nutzen der Maßnahme</li> <li>6. Schätzung eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses</li> </ol>

Quelle: Eigene Darstellung.

Erläuterungen zu den einzelnen Schritten:

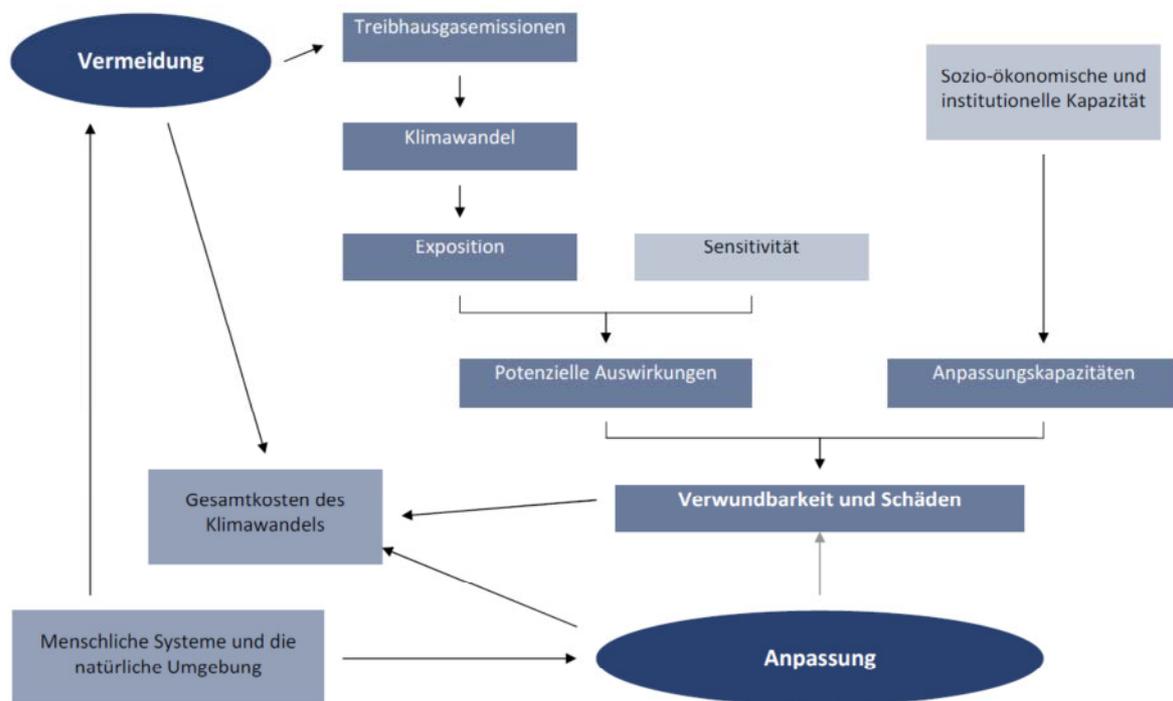
1. Erfassen der Kosten- und Nutzenkomponenten: In diesem ersten Schritt werden die durch die Maßnahme potentiell angesprochenen Kosten- und Nutzenkomponenten ermittelt. Hierbei können nicht betroffene Kategorien, z.B. bestimmte Ökosystemleistungen, ausgeschlossen werden, was das weitere Vorgehen vereinfacht.
2. Datenrecherche zu Kosten und Nutzen: Nachdem die Komponenten erfasst sind, werden verfügbare Daten aus vorhandener Literatur, laufenden Forschungsprojekten oder auch anderen Quellen zusammengetragen. Hierbei sind insbesondere Daten von Interesse, die auf ähnlichen Rahmenbedingungen beruhen.
3. Bezug der Daten auf Hamburg: In vielen Komponenten werden unterschiedliche Bandbreiten an Kosten und Nutzen anzufinden sein. Diese müssen nun auf die Gegebenheiten Hamburgs oder allgemein des Untersuchungsgebiets angepasst werden. Hierbei kann beispielsweise eine Auswahl getroffen werden, welche Studie sich besonders gut auf die Lage in Hamburg übertragen ließe oder aber, in welchem Bereich der Bandbreite Hamburg erwartungsgemäß zu verorten wäre. Gegebenenfalls ist es hierfür zweckmäßig, Expertenmeinungen beispielsweise über einen Workshop mit einzubeziehen. Für einige Kosten- beziehungsweise Nutzenkomponenten wird es eventuell nicht möglich sein, verwertbare Daten zu finden. In diesen Fällen muss eine Abwägung getroffen werden, ob die betreffenden Werte durch Experten geschätzt werden sollten oder aber keine Berücksichtigung finden. Neben den Berechnungen der Werte müssen auch die Unsicherheiten, d.h. die Bandbreiten, an die Gegebenheiten in Hamburg angepasst werden.
4. Abschätzung des Anteils der vermeidbaren Schadenskosten und weiterer Nutzenaspekte durch die Anpassungsmaßnahme (pro Jahr): Meist liegen die Nutzen der Maßnahme nur in einer allgemeinen vor Form, zum Beispiel anhand der Schäden von Ereignissen. Nun muss der durch die spezielle Anpassungsmaßnahme zu reduzierende Anteil der Schadenskosten oder anderer Nutzenkomponenten abgeschätzt werden. Daraufhin werden die Kosten und Nutzen der Maßnahmen für jedes Jahr im Wirkungszeitraum der Maßnahme berechnet.
5. Berechnung des Gegenwartswertes der Kosten und Nutzen der Maßnahme: Kosten fallen in der Regel sofort an, während sich der Nutzen von Anpassungsmaßnahmen oftmals

erst sehr viel später zeigen wird. Um dennoch beide Komponenten vergleichen zu können, ist es daher erforderlich, die Kosten- und Nutzenströme über den Wirkungszeitraum der Maßnahme auf die Gegenwart zu diskontieren. Bei diesem Verfahren werden zeitlich spätere Werte unweigerlich weniger relevant. Die Wahl des Diskontierungssatzes sollte sich an der Methodenkonvention des Umweltbundesamtes orientieren (UBA 2007).

- Schätzung eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses: Abschließend kann je nach Verwendungszweck (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung oder Priorisierung) entweder der Absolutwert des Nettonutzens, d.h. des Nutzens abzüglich aller Kosten, oder aber das Verhältnis der Kosten und Nutzen berechnet werden.

Das Modell der EEA (2008) zeigt, eine Übersicht zu den verschiedenen Ursachen und Wirkungen des Klimawandels und damit auch zu den Bestandteilen unserer bisher in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen zu den Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen.

**Abbildung 1: Vulnerabilität im Kontext von Anpassung und Vermeidung**



Quellen: EEA (2008); eigene Darstellung.

So wirkt sich der Klimawandel auf die Stadt Hamburg zum Beispiel durch einen Anstieg der Sommertage und die Zunahme von Extremwetterereignissen aus. Eine besondere „Exposition“

gegenüber dem Klimawandel ergibt sich aus der Lage Hamburgs an der Küste beziehungsweise am Unterlauf der Elbe. Sensitivitäten bestehen in weiteren Faktoren, wie der Einwohnerdichte des städtischen Gebiets, der Altersstruktur in Hamburg sowie im Bereich der Extremwetterereignisse im Vorhandensein bisheriger Schutzvorrichtungen. Anpassungskapazitäten sind bereits vorhandene sozio-ökonomische und institutionelle Rahmenbedingungen, die eine Anpassung an den Klimawandel erleichtern, zum Beispiel eindeutige öffentliche Zuständigkeiten.

Anpassungsmaßnahmen können Verwundbarkeit und Schäden sowohl über die Anpassungskapazität als auch über die Exposition und die Sensitivität verbessern. Die Anpassungskapazität kann zum Beispiel mit Maßnahmen zur Informationsvermittlung und -aufbereitung oder dem Einrichten von „Klimabüros“ und der Zuordnung von Verantwortlichkeiten zur Klimaanpassung gesteigert werden. In unserer Studie wurde beispielsweise Forschung und Informationsvermittlung zu angepassten Obstsorten erwähnt, welche die Anpassungskapazität von Landwirten in der Landwirtschaft erhöhen kann. Auf der anderen Seite können durch Schutzbauten gegenüber Starkregen oder durch das Einrichten einer Grundwasserregulierung zu einer Verringerung der Exposition und damit geringeren „potenziellen Auswirkungen“ und somit der Schadenskosten führen.

**Tabelle 3: Beispiele für Komponenten des EEA-Modells**

<b>Komponenten des EEA-Modells (2008)</b>	<b>Ökonomische Folgen der Anpassungsmaßnahmen</b>
Potenzielle Auswirkungen	Vermiedene Schadenskosten (z.B. Gebäudeschäden bei Starkregen), Opportunitätskosten (u.a. durch vermiedene Wartezeiten bei Straßensperrungen)
Anpassungskapazität	Vermiedene Schadenskosten durch Erfolge bei Informationsvermittlung, eindeutige Verantwortlichkeiten und damit, z.B. schnellere Reaktionszeiten
Anpassung	Kosten der Anpassungsmaßnahmen

Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen des UBA-Projekts: „Kosten und Nutzen der Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel“ (FKZ 3709 41 121) (vgl. Tröltzsch et al. 2012) wurden 28 Anpassungsmaßnahmen bewertet. Die Untersuchung fand soweit möglich für das gesamte Bundesgebiet statt. Einzelne Maßnahmen konnten nur für Fallstudien berechnet werden,

z.B. grüne Dächer oder die Diversifikation von Tourismusangeboten. Die Nutzen-Kosten-Verhältnisse der untersuchten Maßnahmen zeigen starke Unterschiede.

Infrastrukturmaßnahmen wiesen schlechtere Kosten-Nutzen-Verhältnisse auf als andere Maßnahmentypen. Tendenziell zeichnet sich ab, dass Maßnahmen im Bereich der Infrastruktur, die mit hohen Investitions- und Instandhaltungskosten verbunden sind, ein negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis der monetarisierbaren Größen aufweisen, zum Beispiel im Bereich Energieinfrastruktur. Ausnahmen zeigen sich, wenn Maßnahmen in den regelmäßigen Erneuerungsprozess der Infrastruktur einbezogen werden können und dadurch nur geringe Zusatzkosten aufweisen, zum Beispiel bei einer hitzebedingten Anpassung der Straßeninfrastruktur. Weiterhin treten eher ausgeglichene bis günstige Nutzen-Kosten-Verhältnisse auf, wenn weitere Nutzen neben der Klimawandelanpassung erreicht werden können. Ebenfalls zeigt sich mindestens ein ausgeglichenes Kosten-Nutzen-Verhältnis für Maßnahmen der Bewusstseinsbildung und der Informationsvermittlung, 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 Nutzen-Kosten-Verhältnisse.

**Tabelle 4: Nutzen-Kosten-Verhältnisse des Projekts: „Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel“**

Günstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis	Ausgeglichenes Nutzen-Kosten-Verhältnis	Ungünstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Information für Unternehmen</li> <li>• Klimatisierung von Arbeitsräume</li> <li>• Deicherhöhung</li> <li>• Hitzewarnsystem</li> <li>• Angepasste Pflanzensorten</li> <li>• Beschneigung von Pisten</li> <li>• Vorsorgende Raumplanung im Vergleich zu Hochwasserschutz</li> <li>• Renaturierung von Auen</li> <li>• Hitzeresistente Straßenbeläge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäudeschutz vor Stürmen</li> <li>• Wetterinfos für Verkehr</li> <li>• Frischluftschneisen (Stadt Stuttgart)</li> <li>• Gründächer (Stadt Düsseldorf)</li> <li>• Kühlung von Krankenhäusern</li> <li>• Bodenschutz (Saatverfahren)</li> <li>• Kühlung therm. Kraftwerke</li> <li>• Kläranlagenanpassung an Niedrigwasser</li> <li>• Diversifizierung Tourismus (Radtourismus in Alpenvorland)</li> <li>• Katastrophenschutzübungen</li> <li>• Katastrophenschutzpläne</li> <li>• Schieneninfrastruktur – Schutz gegen Hitze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klimatisierung von Wohnräume</li> <li>• Regenüberlaufbecken</li> <li>• Bewässerung in der Landwirtschaft</li> <li>• Anpassung Stromleitungsnetz</li> <li>• Aufbau Naturschutzgebiete und Vernetzung<sup>a</sup></li> </ul>

*a – bei der Maßnahme: Aufbau Naturschutzgebiete und Vernetzung konnten wesentliche Nutzenkomponenten nicht einbezogen werden.*

Quelle: Tröltzsch et al. (2012)

Aus EU-Studien lässt sich ableiten, dass Maßnahmen zu Informationsvermittlung und Bewusstseinsbildung, zum Beispiel für KMUs, ein günstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen, da sie geringe Investitionskosten zu Beginn aufweisen und unter der Bedingung, dass aufbauend auf eine Sensibilisierung weitere konkret umsetzbare Anpassungsmaßnahmen vorliegen, zu hohen Nutzen führen. Auch Maßnahmen zu Landnutzungsänderungen und dem Erhalt der Biodiversität führen zu höheren Nutzen als Kosten. Dies liegt vor allem an hohen Co-Benefits und im Vergleich zu großen Infrastrukturmaßnahmen eher geringen Kosten zu Beginn der Umsetzung. Allerdings ist dies nicht der Fall für Maßnahmen mit hohen Opportunitätskosten, zum Beispiel bei räumlichen Nutzungskonflikten vor allem in urbanen Zentren. Hoher Nutzen zeigte sich bei Infrastrukturen, die nur als Gesamtnetze funktionieren, zum Beispiel bei vermiedenen Stromausfällen, die eine große Anzahl an Haushalten und Unternehmen betreffen (vgl. Altvater et al. 2012, IEEP 2012).

### **3.1.2 Multikriterien-Analyse**

Eine multikriterielle Analyse (MKA) kommt vor allem zum Einsatz, um die Monetarisierung des nicht marktgängigen Teils des Nutzens und/oder der Kosten zu vermeiden. Die nicht marktgängigen Komponenten werden qualitativ oder quantitativ erfasst, beispielsweise in ihren physikalischen Einheiten (wie „gewonnene Naturschutzfläche in Hektar“). Aber auf eine monetäre Bewertung muss nicht gänzlich verzichtet werden. Wo möglich, können marktgängige Komponenten monetär dargestellt werden, zum Beispiel die Investitionskosten. Dabei wird der Grad der Zielerreichung von Projekten oder Maßnahmen anhand eines mehrdimensionalen Zielsystems für jede Kosten- beziehungsweise Nutzenkomponente aber auch für andere Zielkriterien, wie zum Beispiel Flexibilität, dargestellt.

Mit Hilfe der multikriteriellen Bewertung ist ein Abwägen von sowohl marktgängigen als auch nicht marktgängigen qualitativen und quantitativen Aspekten der Kosten und Nutzen möglich. Mittels einer Gewichtung der verschiedenen Kategorien können die Ergebnisse zu einem Wert zusammengefasst werden, zum Beispiel auf einer Skala von 0 bis 100. Die Methodik ist vor allem geeignet um verschiedene Handlungsalternativen gegeneinander abzuwägen (vgl. Pietsch 2003). Es ist jedoch auch ersichtlich, dass die Unsicherheiten bezüglich

der Monetarisierung nicht marktgängiger Komponenten lediglich verschoben werden, und zwar einerseits in die Zielfestsetzung und Bewertung der Komponenten der MKA und andererseits – sofern angemessen – in die Gewichtung der Komponenten.

Der allgemeine Ablauf einer solchen Analyse wird von Pietsch (2003) folgendermaßen beschrieben:

**Tabelle 5: Allgemeiner Ablauf einer Multikriterienanalyse**

Allgemeiner Ablauf einer Multikriterien- bzw. Nutzwertanalyse
1. Definieren des Ziels der Entscheidung
2. Festlegen der zu erfüllenden Forderungen
3. Aufstellen (und Gewichten) der Erfüllungskriterien
4. Erarbeiten der Handlungsalternativen
5. Bewerten der Handlungsalternativen
6. Auswahl der besten Alternative

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Pietsch (2003).

Da Anpassung an den Klimawandel eine sektorübergreifende Thematik mit vielen nicht monetarisierbaren Bestandteilen ist, scheinen multikriterielle Bewertungen ein geeignetes Instrument, um Entscheidungen zu unterstützen. Multikriterielle Bewertungen von Anpassungsmaßnahmen wurden bereits in mehreren Projekten des Umweltbundesamtes, unter anderem „Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel“ und „Auswertung von Anpassungsprojekten“ methodisch weiterentwickelt und beispielhaft durchgeführt, aber auch im Rahmen von KLIMZUG-Vorhaben und auf EU-Ebene, unter anderem in den Projekten „Climate Proofing der Kohäsionspolitik und der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP)“ und „ClimWatAdapt“ angewendet. Weiterhin wurde in Großbritannien im UK Climate Change Risk Assessment eine Priorisierung anhand des Konzepts des „adaptation pathways“ entwickelt, in dem wichtige Bewertungskriterien wie „regret/no-regret“ oder Flexibilität mit der zeitlichen Dimension verknüpft werden. Auch das niederländische Routeplanner-Projekt hat eine multikriterielle Analyse durchgeführt, um Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren, wie im folgenden Kapitel zu Priorisierung beschrieben wird.

Im Folgenden werden die Kriteriensets der drei Projekte „Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel“, „Auswertung von Anpassungsprojekten“ und „ClimWatAdapt“ verglichen (vgl. Tröltzsch et al. 2012, Wurm et al. 2010, Flörke et al. 2011).

Tabelle 6 zeigt das Bewertungsraster aus Tröltzsch et al (2012). Das Kriterienset umfasst drei Kategorien: Basisinformationen, Daten zur Kosten-/Nutzenerfassung und die Beurteilung von Maßnahmen. Für das Projekt wurde ein breites Kriterienset gewählt, das die durchgeführte Kosten-/Nutzenberechnung mit einer weiteren Beurteilung der Anpassungsmaßnahmen ergänzen soll.

**Tabelle 6: Kriterienset des Projekts: Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen**

Basisinformationen	Kosten-/Nutzen-Erfassung	Beurteilung
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Handlungsfeld</li> <li>- Art der Maßnahme</li> <li>- Bedeutung der Maßnahme für die öffentliche Hand               <ul style="list-style-type: none"> <li>o umsetzende Akteure</li> <li>o öffentliche Finanzierung</li> <li>o Ebene der Umsetzung</li> </ul> </li> <li>- Vollzug               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Vollzugsaufwand</li> <li>o Finanzierungs-/ Anreizinstrumente</li> </ul> </li> <li>- Zeitliche Dimension               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Zeithorizont</li> <li>o Time-lag</li> <li>o Lebensdauer</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kosten               <ul style="list-style-type: none"> <li>o betriebswirtschaftliche Kosten</li> <li>o weitere wirtschaftl. Folgen</li> <li>o externe Kosten</li> </ul> </li> <li>- Nutzen               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Primärnutzen</li> <li>o Sekundärnutzen</li> </ul> </li> <li>- Verlässlichkeit der Aussagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relevanz</li> <li>- Effektivität</li> <li>- Mitnahmeeffekte</li> <li>- Dynamischer Anreiz</li> <li>- Räumliche Reichweite</li> <li>- Akzeptanz               <ul style="list-style-type: none"> <li>o gesellschaftliche Akzeptanz</li> <li>o politische Akzeptanz</li> </ul> </li> <li>- Wechselwirkungen</li> <li>- Flexibilität               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Regret/no-regret</li> <li>o Szenario-Variabilität</li> </ul> </li> </ul>

Quelle: Tröltzsch et al. (2012).

Eine Auswahl von 28 Anpassungsmaßnahmen wurde in dem Projekt mit Hilfe des Kriteriensets beschrieben. Die Analyse basierte auf Literatur und ergänzenden, einzelnen Experteninterviews. Im Rahmen des Projekts wurden aber nur einzelne Kriterien für eine Bewertung kombiniert, zum Beispiel Relevanz und No-regret sowie zeitliche Dringlichkeit, No-regret und Kosten-Nutzen-Bewertung.

Im Rahmen des Projekts „Auswertung von Anpassungsprojekten“ wurden Bewertungskriterien zusammengefasst, die vor allem zum Aufbau der Maßnahmendatenbank des Umweltbundesamtes „Tatenbank“ ([www.tatenbank.anpassung.net](http://www.tatenbank.anpassung.net)) dienten. Ein Hauptziel war da-

bei, den Umfang der Kriterien handhabbar zu halten, so dass im Gegensatz zum sehr ausführlichen Ansatz im vorherigen Beispiel nur vier Hauptkriterien gewählt wurden.

**Tabelle 7: Kriterienset innerhalb des Projekts: Auswertung von Anpassungsmaßnahmen**

<b>Bewertungskriterium</b>	<b>Beschreibung</b>
Wirksamkeit / Effizienz	Maßnahmen, die einen hohen Nutzen bzw. Wirksamkeit in Verhältnis zu den Kosten bzw. Aufwand aufweisen.
Synergien	Maßnahmen, welche die Anpassung an den Klimawandel unterstützen und gleichzeitig einen Nutzen für weitere umweltbezogene und sozio-ökonomische Zielsetzungen haben bzw. ungeachtet der unbekanntenen Ausprägungen des zukünftigen Klimawandels nutzbringend sind.
Partizipation und Akzeptanz	Maßnahmen, bei deren Wahl die relevanten Stakeholder beteiligt und ausreichend berücksichtigt wurden; Maßnahmen, für die eine breite Akzeptanz vorhanden ist bzw. (durch Beteiligung und eventuell Ausgleich) geschaffen werden konnte.
Realisierbarkeit / Übertragbarkeit	Maßnahmen, die mit den gegebenen technischen, sozialen, ökonomischen bzw. institutionellen/politischen Rahmenbedingungen ohne große Hindernisse umgesetzt werden können.

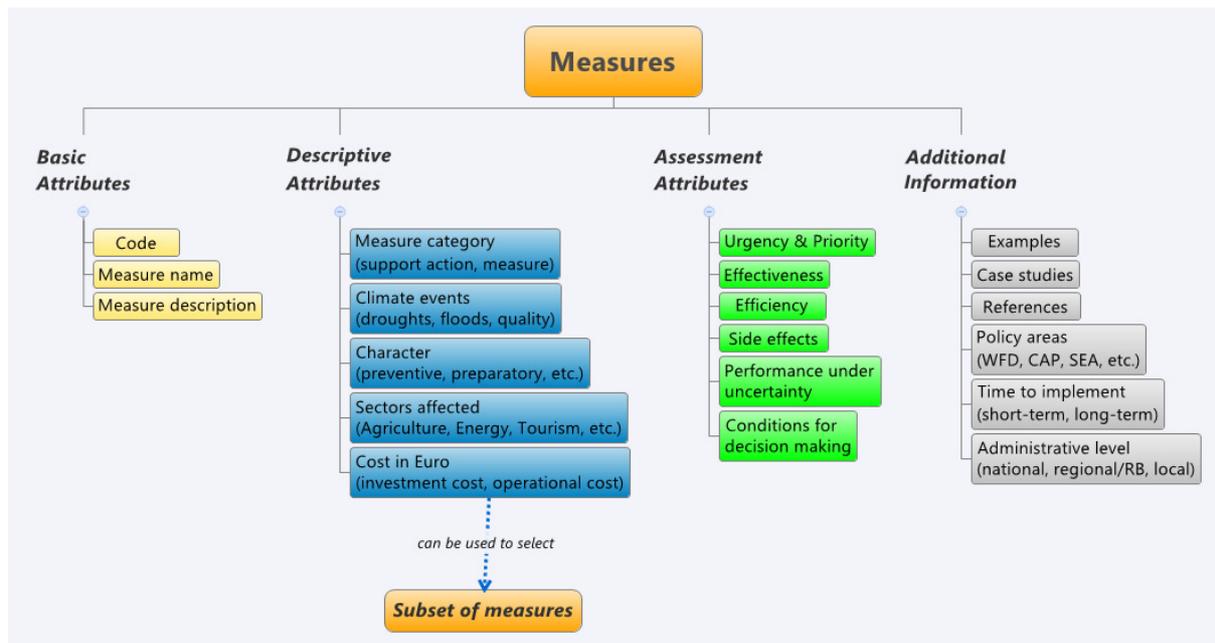
Quelle: Wurm et al (2010).

Die Hauptkriterien wurden dann bei den meisten Kriterien weiter heruntergebrochen, zum Beispiel das Kriterium „Wirksamkeit/Effektivität“ „in Ziel der Maßnahme“, „erste Erfolge“ sowie „geschätzte Kosten“.

Die Maßnahmen werden von den Maßnahmenträgern selbst bewertet. Für eine erste Auswahl an Anpassungsmaßnahmen wurde dies vom Projektteam auf Basis verfügbarer Literatur zu den Einzelmaßnahmen oder zu ähnlichen Maßnahmen durchgeführt.

Das EU-Projekt „ClimWatAdapt“ hat ein Bewertungsraster für Anpassungsmaßnahmen im Wassersektor entwickelt. Darin eingeschlossen sind sowohl Maßnahmen zum Küsten-, Meeres- und Hochwasserschutz (auch an Flüssen), als auch Maßnahmen zum Wasserhaushalt und -management.

Abbildung 2: Bewertungskriterien des Projekts ClimWatAdapt



Quelle: Flörke et al. (2011).

Das Kriterienset besteht aus vier Unterkategorien: Basisinformationen, beschreibende Kriterien, Bewertungskriterien und ergänzende Informationen. Die genannten Kriterien wurden teilweise noch weiter heruntergebrochen, so besteht etwa die Kategorie Side Effects aus den vier Unterkriterien Win-Win, No-Regret, Spill-Over sowie negative Side Effects. Die Bewertung der Maßnahmen in diesem Projekt erfolgte anhand von Literaturquellen, vereinzelt Experteninterviews und eines durchgeführten Expertenworkshops. Auf dem Expertenworkshop wurden die oben dargestellten „Assessment Attributes“ für verschiedene Maßnahmen evaluiert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Ergänzung von Kosten und Nutzenberechnungen mit multikriteriellen Analysen für Anpassungsmaßnahmen sich als sehr sinnvoll herausgestellt hat. Dies gilt vor allem, da Anpassungsmaßnahmen existieren, die eine übertragende Stellung für die öffentliche Hand besitzen, zum Beispiel weil sie die Grundversorgung der Bevölkerung sichern (unter anderem die Gesundheitsversorgung). Weiterhin können weitere nicht monetarisierbare Nutzenkomponenten einbezogen werden.

Die hier dargestellten Kriteriensets umfassen alle die Kriterien Effektivität und Synergien der Maßnahmen. Darüber hinaus werden die gesellschaftliche und politische Akzeptanz sowie

die zeitliche Dringlichkeit bewertet. In den umfassenderen Sets findet auch eine Bewertung des Nutzens unter Annahme der heutigen Klimasituation beziehungsweise des Nutzens im Business-As-Usual-Szenario (No-Regret) statt. Die oben genannte übergeordnete Bedeutung kann zum Beispiel über ein Relevanz-Kriterium beschrieben werden.

### **3.1.3 Sonstige**

Neben Kosten-Nutzen- und Multikriterien-Analysen sind auch mehr beschreibende Methoden wie eine volkswirtschaftliche Wirkungsanalyse oder einer umfassende ökonomische Wirkungsanalyse denkbar (Aufzählung der wichtigsten Kosten und Nutzen auf volkswirtschaftlicher und betriebswirtschaftlicher Ebene). Darüber hinaus wird bei einer volkswirtschaftlichen Wirkungsanalyse eine gesamtwirtschaftliche Betrachtungsperspektive eingenommen, so dass diese Bewertung nicht aus Sicht der politischen Handlungsträger erfolgt. Eine weitere sehr bekannte und allgemein oft benutzte Methode ist die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA). Bei dieser Methode werden die Kosten eines Projekts oder einer Handlungsoption auf eine nicht-monetäre Einheit bezogen. Meist wird dafür eine physische Größe dargestellt, wie Menge an Emissionen in Gewässer oder Luft, die durch eine Maßnahme reduziert werden können (zum Beispiel Kosten pro reduzierte Stickstoff- oder Phosphoremission). Für die Anpassung an den Klimawandel ist die Methode nur bedingt geeignet, da sie sich nicht für die sehr diverse Zielstruktur der Anpassungspolitik und somit sehr diverse Anpassungsmaßnahmen eignet, so kann ein Kühleffekt in Großstädten nicht mit geringerer Bodenerosion in der Landwirtschaft verglichen werden. Eine Anwendung ist nur bei Handlungsoptionen möglich, die in einem Sektor greifen und auf eine Zielgröße ausgerichtet sind und somit über dieses Verfahren verglichen werden können.

## **3.2 Priorisierung von Handlungsfeldern und Maßnahmen**

Bei der Planung der Anpassung an den Klimawandel ist eine Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen nötig. Es gilt, auf Grundlage begrenzter öffentlicher Haushalte und begrenzter privater Kapazitäten zur Anpassung einen möglichst großen Teil der zu erwartenden Schadenskosten mit den vorhandenen Mitteln zu vermeiden. Kernziele der Priorisierung sind daher, ein effizientes Bündel von Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren, beziehungsweise einen effizienten Anpassungspfad zu beschreiben, und die Zustimmung und Konsensbildung

von internen und externen Experten und Stakeholdern zu sichern. Eine solche Priorisierung bleibt letztlich immer eine politische Entscheidung, dabei können jedoch multikriterielle Betrachtungen Informationen strukturieren und bündeln und somit Orientierung für transparente und evidenzbasierte Entscheidungen liefern.

Erste Aktivitäten zur Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen werden auf Bundesebene im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) vorangetrieben. Das Mandat zur Aufstellung des Aktionsplans aus der DAS 2008 umfasst „Grundsätze und Kriterien für die Identifizierung und Priorisierung von Handlungserfordernissen“ sowie eine „Priorisierung von Maßnahmen des Bundes“. Verschiedene Aspekte haben bisher eine Priorisierung innerhalb dieses Prozesses behindert, unter anderem dass keine umfassende Vulnerabilitätsanalyse für Deutschland vorliegt, so dass Klimarisiken und -folgen nicht adäquat betrachtet werden konnten. Obwohl auch im Aktionsplan Anpassung (APA) 2011 noch kein systematisch ausgearbeitetes Priorisierungskonzept angewendet werden konnte, fand eine gewisse Priorisierung von Maßnahmen statt (nicht zuletzt bereits Ressort-intern bei der Auswahl von Maßnahmenvorschlägen<sup>12</sup>). Als prioritär im gegebenen Stadium nennt der Aktionsplan insbesondere die Stärkung der Wissens- und Informationsbasis zu einer problemadäquaten Entscheidungsfindung der einzelnen Akteure sowie die Konzentration auf „No Regret“-Maßnahmen angesichts der fortdauernden Unsicherheit über die tatsächlich zu erwartenden Ausprägungen und Auswirkungen des Klimawandels.

Weiterhin existiert der Vorschlag für ein Priorisierungskonzept auf Bundesebene, in dem neben der Abdeckung von prioritären Klimafolgen und der Beitrag von Maßnahmen zur Zielerreichung der DAS weitere Priorisierungskriterien genannt werden. Dazu zählen unter anderem (vgl. Mahrenholz et al. 2012):

- Strategische Bedeutung,
- Nebenwirkung,
- Flexibilität,
- Akzeptanz,
- Ökonomische Aspekte.

---

<sup>12</sup> Eine Ressort-interne Vorauswahl ist der politischen Kultur geschuldet, führt jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zu sub-optimalen Ergebnissen, da in der endgültigen Priorisierung Maßnahmen und deren Wechselwirkung nicht mehr berücksichtigt werden können. Ein Screening von Maßnahmenvorschlägen nach einheitlichen Kriterien würde sich anbieten, um die Zahl der Optionen in der Priorisierung zu begrenzen.

Weiterhin wurden in mehreren Projekten des Umweltbundesamtes, unter anderem in dem Projekt „Auswertung von Anpassungsprojekten“ beziehungsweise auf EU-Ebene, unter anderem im Projekt „Climate Proofing der Kohäsionspolitik und der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP)“ Priorisierungskonzepte entwickelt. Ein weiteres Forschungsvorhaben aus den Niederlanden „Routeplanner“ setzt sich ebenfalls sehr systematisch mit der Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen auseinander.

Im Rahmen des EU-Projekts „Climate Proofing der Kohäsionspolitik und der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP)“ wurde ein Entscheidungsbaum zur Selektion von förderungswürdigen Maßnahmen auf EU-Ebene entwickelt. Er ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 8: Entscheidungsbaum für Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen (auf EU-Ebene)**

Kriterien	Kurzbeschreibung
1. Relevanz für die öffentliche Hand	Liegen Maßnahmen direkt in öffentlicher Verantwortung? Existieren Marktbarrieren, wodurch Maßnahmen von privaten Akteuren nicht ohne weiteres ergriffen werden?
2. Zeitliche Dringlichkeit	Wann wird das Auftreten von Klimaveränderungen erwartet und was ist die politische und technische Umsetzungsdauer von Maßnahmen?
3. Effektivität	Welcher Teil der Klimaschäden in diesem Bereich können durch die Maßnahme vermieden werden? Variiert dies für verschiedene Szenarien? Hat die Maßnahme bereits unter einem Business-as-usual Szenario positive Wirkungen (No-regret)?
4. Synergien zwischen Anpassungsmaßnahmen oder mit anderen (politischen) Zielen	Inwiefern bedingen oder beeinflussen sich Anpassungsmaßnahmen gegenseitig positiv oder negativ? Inwieweit bieten sich Synergien (Konflikte) mit anderen (politischen) Zielen?
5. Effizienz	Ist die Maßnahme eine effiziente Variante den Anpassungseffekt zu erreichen (günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis)?

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an IEEP (2012).

Bei der Anwendung des Entscheidungsbaums wurde hierarchisch vorgegangen, d.h. erst Kriterium 1: Relevanz für die öffentliche Hand geprüft. Wenn dies positiv ausfällt, kommt Kriterium 2: zeitliche Dringlichkeit zum Zuge, und so weiter. Die Bewertung findet mit den Kriterien „High“, „Medium“, „Low“ bzw. bei Effizienz: „0“ (ungünstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis), „+“ (ausgeglichenes Verhältnis), „++“ (günstiges Verhältnis). Dieser Entscheidungsbaum wurde vor dem Hintergrund von knappen öffentlichen Finanzressourcen entwickelt, um eine Abwägung beziehungsweise erste Orientierung zur Auswahl verschiedener

Optionen zu ermöglichen. Natürlich ist hier zu beachten, dass für einzelne Herausforderungen des Klimawandels eventuell keine Maßnahmen vorliegen, die alle Kriterien „positiv“ erfüllen oder die herausgefilterten Maßnahmen nur einen Teil der Auswirkungen abmildern können, so dass kritisch anzumerken ist, dass mit dem Entscheidungsbaum nur eine Vorauswahl getroffen werden kann, die aber auch weiter kritisch zu hinterfragen und zu prüfen ist.

Im Projekt „Auswertung von Anpassungsmaßnahmen“ wurden folgende Kriterien für eine Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen (vgl. Nickel und Blobel 2010):

**Tabelle 9: Priorisierungskriterien für Anpassungsmaßnahmen der DAS**

Kriterium	Beschreibung
<b>Ergebnisorientierte Kriterien</b>	
Vorsorge / Nachhaltigkeit	Langfristige Vermeidung negativer Auswirkungen des Klimawandels
Positive bzw. negative Nebeneffekte (Synergien / Konflikte)	Nutzen oder Schaden einer Maßnahme für andere umweltbezogene und sozio-ökonomische Zielsetzungen
Minderung Klimarisiken, Effektivität der Maßnahme	Das Potenzial einer Maßnahme, die Vulnerabilität natürlicher und gesellschaftlicher Systeme gegenüber den Folgen des Klimawandels zu verringern bzw. die Anpassungsfähigkeit der Systeme zu erhalten oder zu steigern
No regret (Robustheit)	Maßnahme bringt Nutzen unabhängig von den genauen (noch unbekannt) Ausprägungen des zukünftigen Klimawandels
Flexibilität	Die Möglichkeit der Anpassung einer Maßnahme an zukünftige Veränderungen der Rahmenbedingungen
Reversibilität	Die Umkehrbarkeit einer Maßnahme, falls sich herausstellt, dass Fehlentscheidungen getroffen wurden
Kosten-Nutzen; Wirtschaftlichkeit; Low Cost	Der Nutzen bzw. die Wirksamkeit einer Maßnahme im Verhältnis zu den Kosten bzw. dem Aufwand; geringer finanzieller Aufwand
Zeithorizont/ Dringlichkeit	Die zeitlichen Aspekte einer Maßnahme bzw. die Notwendigkeit, eine Maßnahme mit Priorität umzusetzen, weil die entsprechenden Klimarisiken groß sind, aufgrund eines langen Realisierungshorizonts oder weil Anpassungsmöglichkeiten eingeschränkt werden bzw. im Falle des Aufschubs wegfallen
<b>Prozessorientierte Kriterien</b>	
Akzeptanz und Beteiligung	Politische und/oder gesellschaftliche Akzeptanz, Konsensfindung und evtl. Ausgleich
Subsidiarität	Die Zuweisung / Übernahme von Verantwortung erfolgt nach dem Subsidiaritätsprinzip
Umsetzbarkeit	Administrative Umsetzbarkeit, technische Verfügbarkeit, ausreichende Datengrundlage

Quelle: Nickel und Blobel 2010.

Das Routeplanner-Projekt hat Kriterien für die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen in den Niederlanden erarbeitet und angewendet. Dabei wurde ein qualitatives Bewertungsver-

fahren zur Priorisierung ausgewählt. Die Anpassungsmaßnahmen wurden gegenüber folgenden Kriterien ausgewertet (vgl. de Bruin et al. 2009):

**Tabelle 10: Priorisierung innerhalb des niederländischen Routeplanner-Projekts**

Priorisierung innerhalb des Routeplanner-Projekts
1. Relevanz der Maßnahme – Die Maßnahme ist effektiv und kann einen wesentlichen Anteil an Klimaschäden vermeiden.
2. Zeitliche Dringlichkeit – zeigt den Bedarf kurzfristig zu handeln.
3. No-Regret-Kriterium – Die Maßnahmen zeigt auch Nutzen ohne Klimawandelauswirkungen.
4. Weitere positive Nutzenkomponenten auf andere Sektoren und Arbeitsgebiete.
5. Effekt für Klimaschutz – Ein zusätzlicher Nutzen der Maßnahme tritt auf, da Treibhausgasemissionen reduziert werden, z. B. bei Landnutzungsänderungen.

Quelle: In Anlehnung an de Bruin et al. (2009).

Die Kriterien wurden bei de Bruin et al. (2009) mit Punkten von 1 bis 5 bewertet, wobei 5 die höchste Relevanz, Dringlichkeit oder Ähnliches darstellte.

Die verschiedenen bisher erarbeiteten Priorisierungsmethodiken für eine Auswahl von Maßnahmen zur Klimaanpassung zeigen zum Teil Übereinstimmungen. Wesentliche Kriterien, die in allen Bewertungsrastern vorkommen, sind:

- **Relevanz der Maßnahme** (Effektivität) – die Maßnahme hat das Potential einen wesentlichen Teil der Schäden durch den Klimawandel zu vermeiden.
- **Zeitliche Dringlichkeit** auf Basis der Klimawirkungen und der Umsetzungsdauer für die Maßnahme.
- **Robustheit/No-Regret:** Die Maßnahme zeigt positive Wirkungen bereits heute oder in einem Business-As-Usual-Szenario (ohne Klimawandel).
- **Synergie** bzw. **weitere positive Wirkungen** auf andere Zielstellungen bzw. andere Anpassungsmaßnahmen.

Eine wesentliche Anforderung an ein Priorisierungsverfahren ist, dass die Kriterien und Prozesse transparent definiert werden und die Ergebnisse konsensfähig sind. Es sollten monetarisierbare und nicht-monetarisierbare Kosten und Nutzenkomponenten sowie Risiken der Anpassungsmaßnahmen in die Entscheidung einbezogen werden. Darüber hinaus sollte das Verfahren soweit wie möglich gewährleisten, dass unterschiedliche Datenverfügbarkeit zu

keiner Beeinflussung des Verfahrens führen, d.h. Handlungsfelder in denen zurzeit wenige oder Daten mit geringerer Qualität vorliegen, sollten nicht benachteiligt werden.

### 3.3 Entscheidungsunterstützungstools

Es existieren bereits einige – vornehmlich internetbasierte – Leitfäden und Unterstützungswerkzeuge, um eine Planung und Bewertung von Anpassung allgemein beziehungsweise Anpassungsmaßnahmen im Speziellen durchzuführen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien im Folgenden exemplarisch einige genannt. Ziel ist dabei nicht eine systematische Aufbereitung. Es geht vielmehr darum, zu einer Nutzung dieser unterschiedlich anspruchsvollen Plattformen zu animieren. Gleichzeitig zeigt dies, dass eigene Investitionen in derartige Tools nicht unbedingt notwendig sind.

1. Klimalotse des Umweltbundesamtes

Leitfaden zur Anpassung an den Klimawandel unter

[http://www.klimalotse.anpassung.net/klimalotse/DE/02\\_Intensivdurchlauf/0\\_home/home\\_node.html](http://www.klimalotse.anpassung.net/klimalotse/DE/02_Intensivdurchlauf/0_home/home_node.html)

2. Stadtklimalotse der ExWost-Forschungsprogramms

Beratungsinstrument zur Auswahl von Klimaanpassungsmaßnahmen für die kommunale Stadtentwicklung

<http://www.stadtklimalotse.net/stadtklimalotse/>

3. Klimascout für Kommunen

Kleines Online-Lexikon für Städte und Gemeinden unter

<http://www.klimascout.de/kommunen/index.php?title=Hauptseite>

4. Tatenbank des Umweltbundesamtes

Datenbank für Projekte und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel

<http://www.tatenbank.anpassung.net>

5. European Environment Agency

Europäische Plattform zur Anpassung an den Klimawandel unter

<http://climate-adapt.eea.europa.eu/> beziehungsweise

<http://climate-adapt.eea.europa.eu/web/guest/adaptation-support-tool/step-1>

6. Future Cities: Adaptation Compass

Orientierungs-Tool zum “Climate Proofing” von Städten

<http://www.future-cities.eu/project/adaptation-compass.html>

7. BalticClimate Toolkit

Instrument zur Entscheidungsunterstützung, unter anderem für öffentliche Entscheidungsträger

<http://www.toolkit.balticclimate.org/>

8. UKCIP

Sammlung verschiedener Tools, teilweise differenziert nach Zielgruppe, unter

<http://www.ukcip.org.uk/tools/>

9. UNFCCC

Kompendium von Methoden und Tools unter

[http://unfccc.int/adaptation/nairobi\\_workprogramme/knowledge\\_resources\\_and\\_publications/items/5457.php](http://unfccc.int/adaptation/nairobi_workprogramme/knowledge_resources_and_publications/items/5457.php)

10. Ecosystem-Based Management Tools Network

Zusammenstellung von Bewertungstools unter

<http://ebmtoolsdatabase.org/resource/climate-change-vulnerability-assessment-and-adaptation-tools>

## **4 Empfehlungen für die Anpassungsstrategie der Stadt Hamburg**

### **4.1 Allgemeine Handlungsempfehlungen**

Die meisten allgemeinen Handlungsempfehlungen für die Stadt Hamburg gehen unmittelbar aus den Herausforderungen und damit den in Kapitel 2.2 gemachten Erwägungen hervor. Insofern beschränken wir uns hier auf eine Aufzählung der aus unserer Sicht wichtigsten Punkte. Diese richten sich dabei ausdrücklich an die Ebene der Politik und der Verwaltung.

- Staatliche Rolle prüfen und festlegen.
- Ziele der Hamburger Klimaanpassung definieren und ihre Erreichung zu evaluieren.
- Klimafolgen überwachen und deren Konsequenzen analysieren (lassen).
- Regulatorischen Rahmen auf die Berücksichtigung von Klimafolgen überprüfen und gegebenenfalls daraufhin ändern.
- Austausch zwischen einzelnen Ressorts und Verwaltungsebenen zum Thema Anpassung unterstützen.
- Informationen bereitstellen und vermitteln (lassen). Hierbei auch Maßnahmen benennen und katalogisieren.
- Eigenvorsorge von privaten Akteuren stärken.
- Im staatlichen Bereich flexible Anpassungsmaßnahmen bevorzugen, diese planvoll und koordiniert angehen sowie vor und nach der Implementierung bewerten.
- Öffentlichkeit beziehungsweise Stakeholder frühzeitig beteiligen.
- Austausch zwischen Akteuren organisieren beziehungsweise ermöglichen.
- Kommunikation, Bildung und Forschung unterstützen, koordinieren und kanalisieren.

### **4.2 Empfehlungen für einzelne Handlungsfelder**

#### **4.2.1 Küsten- und Hochwasserschutz**

Für die Stadt Hamburg stellt der Hochwasserschutz eine besondere Herausforderung dar, da große Teile des Stadtgebiets in überflutungsgefährdeten Bereichen liegen. Trotz des hohen Niveaus der bereits vorhandenen Hochwasserschutzmaßnahmen führt die räumliche Ballung

von privaten und öffentlichen Vermögensgegenständen zu einer hohen Exposition der Stadt gegenüber den Folgen des Klimawandels, d.h. einer hohen Verletzlichkeit. Es ist daher zu überprüfen, inwiefern zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, um auch in Zukunft ein optimales Schutzniveau für die Region zu gewährleisten. Bei der Suche nach und Analyse von geeigneten Anpassungsmaßnahmen sollte die Möglichkeit eines Residualschadens nach Durchführung der Maßnahme dabei nicht von vornherein ausgeschlossen werden. Denn ein hoher Netto-Nutzen (Nutzen abzüglich Kosten und Residualschaden) einer Maßnahme muss nicht zwangsläufig mit einem erwarteten Schaden von Null einhergehen.

Während die Kosten für die Durchführung einer Anpassungsmaßnahme, wie beispielsweise einer Deicherhöhung, meist relativ leicht zu ermitteln sind, stellt sich die monetäre Bewertung ihres Nutzens oft als schwierig dar. Als Approximation wird in der Regel der vermiedene Schaden bei Eintreten eines Flut- oder Hochwasserereignisses angesetzt. Darüber hinausgehende Schäden (z.B. Beschädigung von Ökosystemen) oder Nutzen (z.B. touristische Nutzung des Deiches) werden dagegen selten betrachtet – vermutlich aufgrund der Schwierigkeiten ihrer Montarisierung. Ebenso konzentrieren sich Schadensschätzungen häufig auf direkte Schäden an Gebäuden und Inventar. Eine umfassende Schadensschätzung sollte jedoch auch die indirekten Schäden durch Produktionsverluste, Folgeschäden für die Natur oder Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit berücksichtigen.

Für eine systematische Abschätzung der zu erwartenden Schäden erscheint es sinnvoll, relative Schadensfunktionen in Abhängigkeit von der Überflutungshöhe und, falls möglich, weiteren Parametern zu entwickeln. Die Schadensfunktionen könnten sich auf Gebäudetypen, Flächennutzungsarten oder ähnliche Kriterien beziehen, für welche die Verteilung über das Stadtgebiet bekannt ist. Sie bieten zudem die Möglichkeit, Änderungen in den Klimaszenarien und damit verbundene Änderungen in den erwarteten Überflutungshäufigkeiten und -höhen relativ einfach in der Kalkulation der erwarteten Schadenskosten zu berücksichtigen. Detaillierte Schadensfunktionen für Wilhelmsburg wurden bereits in dem Projekt XtremRisk vom Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg Harburg entwickelt. Im Rahmen des Projekts KLIMZUG-NORD werden darüber hinaus Simulationen der indirekten Schäden infolge einer Überflutung in Wilhelmsburg angestellt. De Kok und Grossmann (2009) oder Hallegatte et al. (2011) liefern weitere Beispiele für die Abschätzung direkter und indirekter Schäden, an denen sich eine Entwicklung von Schadensfunktionen für die Stadt Hamburg orientieren kann.

Da die Kosten für eine Anpassungsmaßnahme stark von den regionalen Gegebenheiten beziehungsweise ihren Voraussetzungen abhängen, bleibt eine individuelle Kosten-Nutzen-Analyse vor Durchführung einer bestimmten Maßnahme nicht aus. Allerdings können Rankings, welche die Bedeutung und Dringlichkeit einer Maßnahme sowie Synergien und Widersprüche berücksichtigen, bei der Priorisierung von Maßnahmen helfen. Eine Orientierung hierfür liefern van Ierland et al. (2007) und de Bruin et al. (2009). Die Einbeziehung von Fachleuten und regionalen Akteuren gewährleistet dabei die Berücksichtigung gebietspezifischer Gegebenheiten und kann gleichzeitig dazu dienen, die Akzeptanz einzelner Maßnahmen zu erhöhen.

Die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen erfolgt durch lokale Akteure, da Klimafolgen regional sehr unterschiedlich sind und potentielle Schäden lokal anfallen. Trotzdem sollte gerade im Küsten- und Hochwasserschutz eine Abstimmung zwischen den Regionen stattfinden, die sich im selben Einzugsgebiet befinden. Wie de Kok und Grossmann (2009) am Beispiel des Elbeeinzugsgebiets zeigen konnten, nimmt das Flutrisiko stromabwärts zu, wenn stromaufwärts einseitig eine Deicherhöhung durchgeführt wird. Die Wirkung einer Ausweitung der Retentionsflächen entlang der Elbe erscheint dagegen sehr effektiv in Hinblick auf die vermiedenen Schäden im gesamten Einzugsgebiet. Gesamtwirtschaftlich ließe sich durch Kooperation also unter Kosten- und Nutzensgesichtspunkten ein optimales Niveau der Anpassung realisieren.

#### **4.2.2 Wasserwirtschaft**

Nach bisherigen Projektionen zum Klimawandel sind für die Stadt Hamburg und umliegende Gebiete keine Probleme bei der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung zu erwarten (Dannenbergh et al. 2009, Zebisch et al. 2005, Gerstengarbe et al. 2003). Längere Trockenperioden können aber Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben, insbesondere auf Anbausorten, die Flachwurzler sind.

Effiziente Bewässerungsmethoden sind eine Anpassungsmaßnahme, deren Umsetzung bereits heute oftmals wirtschaftlich sinnvoll ist. Es ist jedoch unsicher, ob das Wasserdargebot Ende des 21. Jahrhunderts noch ausreichen wird, so dass Bewässerung in allen Jahren durchgeführt werden kann. Wassersammel- und Wasserspeichersysteme ermöglichen eine Bewässerung auch in trockenen Perioden. Nach derzeitigen Vorhersagen wird in Hamburg im Jahresverlauf auch in Zukunft ausreichend Grundwasser neugebildet. Ein Großteil der

Niederschläge verlagert sich jedoch in den Winter wird, wo wesentlich weniger Wasser in der Landwirtschaft benötigt wird.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vermeidung von Wasserverlusten im Versorgungsnetz und die Steigerung der Wassereffizienz bei den Endnutzern. Die Verlustrate durch Undichtigkeiten in den Rohren ist in Deutschland insgesamt sehr gering, was ein Indikator dafür ist, dass die Wasserversorgungssysteme in Deutschland schon recht gut ausgebaut und geprüft werden. Für das Versorgungsnetz ist mit HamburgWasser ein öffentliches Unternehmen in direkter Verantwortung.

Durch die erhöhte Quantität und Qualität von Starkniederschlägen und die jahreszeitliche Verschiebung der Niederschläge in den Winter steigt die Gefahr von hohen Grundwasserspiegeln und damit einer Vernässung von Fläche und Kellern, ebenso wie eine mögliche Beeinträchtigung von Infrastrukturen. Wie die in diesem Projekt durchgeführte Fallstudie zeigt, ist eine gebietsbezogene Grundwasserregulierung für besonders betroffene Gebiete gesamtwirtschaftlich günstig. Dem gegenüber steht die Erhöhung der Eigenvorsorge der Hausbesitzer. Die Ausgaben einer gebietsbezogenen Grundwasserregulierung würden durch öffentliche Institutionen getragen werden. Anreize für eine Eigenvorsorge könnten mit Hilfe von Informationen oder Fördermitteln gesetzt werden. Ein direkter Vergleich der Kosten und Nutzen der beiden Optionen steht jedoch noch aus.

Maßnahmen, die gegen einen hohen Grundwasserspiegel wirken, bieten bei entsprechenden Ereignissen bereits heute Schutz. Vor allem die Stärkung der Eigenvorsorge beim Bau von neuen Gebäuden sollte frühzeitig begonnen werden, da Gebäude eine relative lange Lebensdauer aufweisen und Maßnahmen an Bestandsgebäuden wesentlich aufwendiger sind.

### **4.2.3 Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz**

Die Landwirtschaft in Hamburg wird voraussichtlich klimawandelbedingt in Zukunft verstärkt von Extremwetterereignissen wie Starkniederschlägen, Hagel und Trockenperioden betroffen sein. Zusätzlich verlagern sich die Niederschläge innerhalb des Jahres aus dem Sommer vor allem in den Winter. Hieraus ergeben sich Perioden mit sehr hohen Niederschlagswerten und Trockenperioden, somit insgesamt höhere saisonale Schwankungen der Grundwasserstände, was unter anderem die Wasserhaltefähigkeit und -infiltrierbarkeit der Böden beeinflusst. Ebenfalls wird ein Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen und der extremen

Hitzeereignisse vorhergesagt. Die Kombination aus Starkniederschlägen, Stürmen, erhöhten Temperaturen und Trockenperioden wird die bisher schon vorhandene Tendenz zu Bodenerosion noch verstärken.

Für den Landwirtschaftssektor werden jedoch auch positive Veränderungen durch eine verlängerte Vegetationsperiode und höhere Sonneneinstrahlung prognostiziert, die zu einer Zunahme der Erträge führen können, wie zum Beispiel Berechnungen von Kemfert und Kremers (2009) für den Obstanbau im Alten Land zeigen. Allerdings treten durch höhere Temperaturen auch weitere negative Folgen zutage, wie eine erhöhte Gefahr von Frostschäden durch einen früheren Blütebeginn und eine verstärkte Ausbreitung von Schädlingen oder Krankheiten.

Auf dieser Basis ist es angezeigt, eine veränderte Sortenwahl anzustreben, sowohl hin zu trockenresistenteren Sorten als auch zu Sorten, die eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Stürmen und Starkniederschlägen aufweisen, zum Beispiel Pflanzen mit flexiblerem Stängel, stärkeren Wurzelballen oder Pflanzen, die auf Staunässe tolerant reagieren. Weiterhin bieten sich zur Förderung der Wasserhaltefähigkeit der Böden konservierende Bodenbearbeitungsmethoden an, die noch dazu der Bodenfruchtbarkeit dienen und gegen Bodenerosion wirken. Ebenfalls können Feldraine oder Hecken an Feldrändern die Infiltration erhöhen. Ein Wasserrückhalt in der Fläche hat ebenfalls positive Effekte. Baulicher Wasserrückhalt kann in Trockenperioden für die Bewässerung genutzt werden. Neben konservierenden Bodenbewirtschaftungsmethoden können gegen Bodenerosion auch Winterungen auf die Felder aufgebracht werden oder Obstbäume mit Boden bedeckender Bepflanzung kombiniert werden.

Für den Erhalt der biologischen Vielfalt und den weiteren Naturschutz bietet sich ein nachhaltiges Waldmanagement an, das einen klimaangepassten Artenmix verwendet, zum Beispiel trockenresistente Arten. Darüber hinaus sollte Aufforstung und Begrünung beziehungsweise eine Verknüpfung von bestehenden Grünflächen angestrebt werden, zum Beispiel durch Grünkorridore.

Für viele Maßnahmen ist die Reaktionszeit der Landwirtschaft kurz, zum Beispiel werden Aussattermine jedes Jahr neu festgelegt und auch Sortenanpassungen (bei vorhandenen nutzbaren Sorten) können bei vielen Pflanzenarten in jedem oder innerhalb weniger Jahren stattfinden. Weitere Maßnahmen sind zwar kurzfristig umsetzbar, weisen aber höhere Investitionskosten auf, die eine Festlegung auf mehrere Jahre herbeiführen, zum Beispiel bei einer

Umstellung zu naturverträglicheren Saatverfahren. Zu den mittel- und langfristigen Maßnahmen zählen beispielsweise Pflanzenzüchtungen oder Landnutzungsänderungen, wie die Regeneration von Mooren (vgl. Altvater et al. 2012, IEEP 2012).

Nicht alle diese Maßnahmen müssen zwangsläufig von der öffentlichen Hand getragen oder koordiniert werden. Die Landwirte werden viele Maßnahmen mindestens zu einem Teil auch autonom durchführen. Eine Anpassung an veränderte Klimabedingungen gehört zu den täglichen Aufgaben eines Landwirtes. Daher sollte eine Unterstützung durch die öffentliche Hand einen hohen Ausstrahlungseffekt haben, indem beispielsweise Entwicklungen hin zu einem nachhaltigen und schonenden Umgang mit Ressourcen gefördert oder Pilotmaßnahmen unterstützt werden. Weiterhin besteht eine wichtige Aufgabe in der Weiterentwicklung beziehungsweise der Prüfung der Eignung von Sorten in Forschungsvorhaben.

Viele Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft verfügen über ein No-Regret Potential, d.h. dass sie auch bereits heute aktuellen Problemen in der Landwirtschaft und im Naturschutz entgegenreten. Diese Maßnahmengruppe sollte daher mit Vorrang unterstützt werden.

#### **4.2.4 Wirtschaft, Energie und Tourismus**

Die verschiedenen Wirtschaftssektoren sind vor allem bei einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen negativ vom Klimawandel betroffen. Hierzu zählen Starkregenereignisse, Überflutungen, Stürme oder Hitzeperioden.

Es existieren zahlreiche Abschätzungen von Schäden vergangener Ereignisse, wie beispielsweise infolge des Hurrikans Katrina in den USA (Hallegatte 2008), die auch die indirekten Schäden durch Produktionsverluste für einzelne Wirtschaftszweige abschätzen und Lieferverflechtungen berücksichtigen. Welche Rolle der Klimawandel für die zu erwartenden Schäden in der Zukunft spielen wird, bleibt bisher allerdings unklar. Bevor also konkrete Anpassungsmaßnahmen geplant werden, wäre es wünschenswert, nähere Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen zukünftigen klimatischen Bedingungen und der Entwicklung der Schäden an Produktivkapital und der infolgedessen auftretenden indirekten Schäden zu erlangen.

Genauere Untersuchungen liegen bereits für die Auswirkungen von Hitze auf die Produktivität vor. Demnach würde sie bei einer Zunahme der Hitzetage leicht sinken, was auch eine

leichte Verringerung des Sozialproduktes mit sich brächte. Auch wenn eine Anpassung daran gesamtwirtschaftlich wünschenswert ist, müssen entsprechende Anpassungsmaßnahmen hier vor allem auf betrieblicher Ebene durchgeführt werden. Dazu könnten zum Beispiel die Verschattung und Dämmung von Gebäuden zählen. Hier kann die öffentliche Hand mit der Verbreitung von Informationen dazu beitragen, das Bewusstsein bei den Unternehmen für diese Problematik zu schaffen beziehungsweise zu schärfen und Beratungsangebote initiieren. Stadtplanerische Änderungen, die die Belüftung in der Stadt verbessern, können ebenfalls zur Kühlung von Gebäuden beitragen. Solche Maßnahmen bedürfen allerdings einer langen Vorlaufzeit und müssen viele weitere Aspekte (Verkehrsplanung, Bauleitplanung usw.) berücksichtigen, so dass sie sich nicht an einzelbetrieblichen Interessen orientieren können.

Für den Tourismussektor lassen sich bisher kaum Aussagen über klimawandelbedingte Auswirkungen machen. Insbesondere für den Städtetourismus gibt es bisher kaum Untersuchungen. Vermutlich werden hier gerade für den mitteleuropäischen Raum andere Faktoren, wie das kulturelle Angebot oder das Image einer Region, stärkere Auswirkungen auf die zukünftigen Touristenzahlen haben.

Der Energiesektor ist einer der Sektoren, der bereits im Zuge der Forschung zur Vermeidung von THG-Emissionen ausführlich untersucht wird. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse finden zum Teil Eingang in die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen. Doch auch speziell im Bereich der Anpassung an den Klimawandel gibt es bereits eine Reihe von Studien, die sich mit den Kosten von Stromausfällen, einer Veränderung der Energienachfrage oder möglichen Anpassungsmaßnahmen beschäftigen. Die Bedeutung des Energiesektors ergibt sich aus seiner Rolle als Schlüsselsektor. Eine Unterbrechung der Energieversorgung kann weitreichende wirtschaftliche und soziale Effekte nach sich ziehen. Daher ist hier eine Anpassung an mögliche klimatische Änderungen besonders angezeigt.

Trotz der relativ weit fortgeschrittenen Forschungsarbeiten im Handlungsfeld Energie fehlt es noch immer an Methoden zur Abschätzung der Effekte von Energieversorgungslücken auf die Wirtschaft und das soziale Leben. Außerdem finden sich in der Literatur kaum quantitative Angaben zu den Kosten von Anpassungsmaßnahmen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Konkrete Forschungsarbeit sollte dabei vor allem drei Problembereiche untersuchen. Zum ersten zeichnen sich die herkömmlichen Kraftwerke durch eine hohe Wasserentnahme aus

der Natur aus, die sie vor allem für Kühlzwecke benötigen. Es wird erwartet, dass es im Zuge des Klimawandels zu einer Verknappung des dafür zur Verfügung stehenden Wassers sowie zu einer Verringerung des nutzbaren Temperaturgradienten kommt. Umgekehrt stehen einer uneingeschränkten Rückleitung des erwärmten Kühlwassers umweltschutzrechtliche Vorgaben entgegen. Lösungen hierfür könnten zum Beispiel in neuen Technologien oder einer Anpassung der Wasserentnahmerichtlinien liegen. Negative Auswirkungen auf Ökosysteme müssten als Kosten der Anpassungsmaßnahme berücksichtigt werden.

Zum zweiten können Extremwetterereignisse zu einer Beschädigung der Energieinfrastruktur führen und somit Versorgungslücken verursachen. Für eine Kosten-Nutzen-Analyse wären die Kosten für den Einsatz neuer, widerstandsfähiger Materialien den Kosten eines Ausfalls der Energieversorgung gegenüberzustellen.

Das dritte Forschungsfeld bezieht sich auf die Energienachfrage. Diese kann sich durch zahlreiche Maßnahmen beispielsweise im Gebäudesektor an eine zukünftig volatilere Energieversorgung und an die Erwartung steigender Energiepreise anpassen. Die bereits geltenden Energiestandards, die ursprünglich aus Gründen des Klimaschutzes eingeführt wurden, tragen bereits gleichzeitig einen Teil zur Klimaanpassung bei. Es sind auf der anderen Seite allerdings auch Anpassungsmaßnahmen denkbar, die eine höhere Energienachfrage bewirken könnten, wie beispielsweise der Einsatz von Klimaanlage in Wohn- und Bürogebäuden oder der vermehrte Einsatz von Bewässerungsanlagen in der Landwirtschaft. Die Entwicklung der Energienachfrage als Reaktion auf den Klimawandel bleibt daher ungewiss.

Aufgrund der zahlreichen Unsicherheiten, die bezüglich der Entwicklungen der klimatischen Bedingungen, der Energienachfrage und der erneuerbaren Energien bestehen, wäre es sinnvoll eine Bandbreite an Szenarien zu entwickeln, die möglichst viele Unsicherheitsquellen abdecken. Diese können den Kraftwerks- und Netzeigentümern als Orientierung bei ihren Planungen dienen. Ebenso sollte der Dialog zwischen der Forschung und den Ingenieuren beziehungsweise Kraftwerks- und Netzbetreibern gefördert werden, um Wissen zu bündeln und daraus innovative und realisierbare Lösungsansätze zu entwickeln.

## **4.2.5 Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur**

### **4.2.5.1 Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen**

Laut Norddeutschem Klimabüro kann für Hamburg eine Erhöhung der durchschnittlichen Temperaturen und der Anzahl der Hitzetage erwartet werden, so dass verstärkt Hitzeeffekte in der Stadt auftreten können. Anpassungsmaßnahmen im Bereich Stadt- und Raumplanung sowie Grünflächen können direkter und indirekter Natur sein. Maßnahmen umfassen dabei die Integration der Auswirkungen des Klimawandels in Stadtplanungsprozesse (indirekt), sowie den Ausbau und Erhalt von Grünflächen, die durch andere Nutzungsvarianten bedroht sind (direkt).

Ebenfalls sollte sich der Grad der Versiegelung in Städten vorerst nicht weiter erhöhen und mittel- bis langfristig eher vermindern. In Hamburg ist bereits eine gesplittete Abwasserabgabe in Kraft, die zu diesem Ziel beitragen kann.

Da stadt- und bauleitplanerische Prozesse langfristige Auswirkungen haben und nur sehr schwierig rückgängig gemacht werden können, sollten die Änderungen von Planungsprozessen so früh wie möglich umgesetzt werden. Auch bei der Neubepflanzung von Grünflächen und Dächern ist damit zu rechnen, dass einige Jahre notwendig sind, bis die gesamte Kühl- und Wasserrückhaltewirkung eintritt (Tröltzsch et al. 2011).

Hamburg ist ebenfalls durch den Meeresspiegelanstieg und stärkere Hochwasser und Stürme betroffen, so dass zusätzliche Überschwemmungsgebiete ausgewiesen werden könnten. Dies sollte ebenfalls möglichst frühzeitig angegangen werden, da sehr wahrscheinlich gerade in einer Großstadt wie Hamburg Flächennutzungskonflikte auftreten, die auch teilweise die Umsetzungsdauer erheblich verlängern.

Ferner sind hier die positiven Co-Benefits (Neben- oder Zusatznutzen) naturnaher Maßnahmen im Bereich Stadt- und Bauleitplanung und Grünflächen zu nennen: Aufforstung und das Einrichten von größeren Grünflächen trägt zum Erhalt der Artenvielfalt bei. Darüber hinaus bestehen positive Effekte durch die Verbesserung der Wasserqualität an Küsten und Flüssen. Es ist somit ersichtlich, dass diese Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel Überlappungen mit der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und der nationalen Biodiversitätsstrategie zeigen. Die meisten der Maßnahmen können somit als No-Regret bezeichnet werden und haben bereits heute eine positive Wirkung.

Ökonomische Berechnungen zu Stadt-/Bauleitplanung beziehungsweise Grünflächen und Klimaanpassung liegen bisher nur in eingeschränktem Umfang vor. Die Studien von Altva-

ter et al. (2012) und Tröltzsch et al. (2012) zeigen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ein mindestens ausgeglichenes Verhältnis von Kosten und Nutzen. Darüber hinaus konnten wichtige Nutzenkomponente bisher nicht einbezogen werden, wie beispielsweise der Erhalt der Artenvielfalt oder die Abmilderung von Niederschlagsspitzen beziehungsweise die Erhöhung der Attraktivität und der Lebensqualität in Städten. Ein Alternativenvergleich zwischen einer Maßnahme des Hochwasserschutzes über Deiche und einer Maßnahme zur veränderten Stadtplanung (mit der Umsiedelung eines Wohnungsgebiets an einen nicht-hochwassergefährdeten Ortsteil) zeigt aber auch, dass die Betrachtungsperspektive ausschlaggebend für das Ergebnis der Abwägung ist: Aus der Sicht der Gemeinde, d.h. nur unter Berücksichtigung der vermiedenen Schäden an öffentlichen Gebäuden, überwiegen die Kosten einer veränderten Planung den Nutzen für die Gemeinde. Zugleich ergibt sich der Nutzen in erster Linie für private Immobilienbesitzer.

#### **4.2.5.2 Infrastruktur**

Zahlreiche Studien untersuchen mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Straßenbeläge, Schienen und Wasserwege. Sie zeigen zudem mögliche technische oder verhaltensorientierte Maßnahmen auf, diesen zu begegnen und so Verkehrsbehinderungen zu vermeiden. Erste Ansätze für Kosten-Nutzen-Analysen konkreter Maßnahmen bieten Tröltzsch et al. (2012). Sie untersuchen den Einsatz neuer Straßenbeläge, die Anpassung der Schieneninfrastruktur an starke Temperaturschwankungen und Hitze sowie den Einsatz von Wetterdienstleistungen in der Transportbranche. Die Studie bietet eine gute Orientierung für die Bewertung möglicher Maßnahmen. Der Planung von Maßnahmen vorausgehen sollte allerdings eine Betroffenheitsanalyse der Verkehrsinfrastruktureinrichtungen. Diese sollte auf den für die Stadt Hamburg entwickelten Klimaszenarien basieren und den Handlungsbedarf für die einzelnen Einrichtungen aufzeigen.

Im Bereich der Abwasserinfrastruktur zeigt sich bereits heute, dass die bestehenden Systeme Starkregenereignissen nicht in jedem Fall Stand halten können (siehe Fallstudie Starkregen). Daraus ergibt sich bereits heute Handlungsbedarf für eine Anpassung des städtischen Wassersystems beispielsweise durch eine Sanierung des Entwässerungssystems, Schaffung von Retentionsflächen oder Wasserspeichermöglichkeiten. Welcher „Klimaaufschlag“ bei der Planung dieser Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollte, ist bisher unklar. Es erscheint daher zunächst angeraten, unter Berücksichtigung der Klimaszenarien und beste-

hender Unsicherheiten bezüglich der Häufigkeit und Intensität zukünftiger Extremereignisse diesen Aufschlag zu ermitteln. Kosten-Nutzen-Analysen für die Anpassung der Abwasserinfrastruktur sind generell möglich, sofern die Kosten für die einzelnen Maßnahmen bekannt sind. Methoden für die Ermittlung des Nutzens, also der vermiedenen Schäden, sind vorhanden (siehe Fallstudie Starkregen).

Für den Bereich der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur fehlen dagegen gänzlich Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels und möglichen Anpassungsmaßnahmen. Aufgrund ihrer großen Bedeutung für Wirtschaft und Gesellschaft sollte diese als kritisch eingestufte Infrastruktur auf ihre Vulnerabilität gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels untersucht werden. Sofern Handlungsbedarf besteht, sollte eine Zusammenarbeit zwischen staatlichen Stellen und privaten Netzanbietern angestrebt werden.

#### **4.2.6 Menschliche Gesundheit**

Der Norddeutsche Klimaatlas zeigt, dass die jährlichen Durchschnittstemperaturen in Hamburg um mehrere Grad ansteigen werden. Darüber hinaus ist eine zunehmende Anzahl von Sommer- und Hitzetagen prognostiziert. An Sommertagen steigen die Temperaturen über 25°C, an Hitzetagen über 30°C. Dauerhaft hohe Temperaturen sind ein Gesundheitsrisiko für Menschen mit Herz-Kreislaufschwäche, insbesondere für ältere Menschen. Die Folgen reichen von Dehydrierung bis zum Hitzschlag mit möglicher Todesfolge.

Verursacht durch eine hohe Flächenversiegelung tritt in Städten der Wärmeinseleffekt auf, der die Temperaturen nochmals wesentlich ansteigen lässt. An Hitzeinseln können somit auch in Hamburg sehr hohe Tages- und Nachttemperaturen erreicht werden.

Eine mögliche Anpassungsmaßnahme, die in der Verantwortung der öffentlichen Hand liegt, ist daher der weitere Ausbau des Hitzewarnsystems verbunden mit konkreten Informationen an Pflegeheime, Krankenhäuser, wie zum Beispiel in Hessen umgesetzt, und vor allem die weitere Informationsvermittlung über Handlungsoptionen, die Integration in die Abläufe von Krankenhäusern etc. Wie das Beispiel aus Hessen zeigt, stellen auch Kontrollen in und Beratung von Einrichtungen während Hitzeereignissen einen wichtigen Bestandteil dar. Die Maßnahme zeigt darüber hinaus bereits Nutzen unter heutigen Klimabedingungen und kann zu relativ günstigen Kosten umgesetzt werden (Tröltzsch et al. 2012, IEEP 2012). Allerdings ist die Maßnahme nur effektiv, wenn diese nicht nur aus einer reinen Informationsaufbereitung besteht, sondern mit weiteren Empfehlungen für konkretes Verhalten bei Hitze, unter ande-

rem in Krankenhäusern, Pflegeheimen, Schulen oder Kindergärten verbunden ist. Weiterhin gehören dazu die Weiterbildung und die Sensibilisierung des Personals in den Einrichtungen. Die Entsiegelung von Flächen, zum Beispiel durch das Einrichten beziehungsweise den Erhalt von Grünflächen, kann diese Wärmeeffekte reduzieren. Hier bestehen große Überlappungen mit dem Handlungsfeld Stadt- und Bauleitplanung beziehungsweise Grünflächen.

Weitere gesundheitliche Auswirkungen gehen von Extremwetterereignissen aus, vor allem Hochwasser und Stürmen. Der Schutz gegenüber diesen Maßnahmen besteht in der Anpassung von Gebäuden, beim Küstenschutz, sowie beim Katastrophenschutz (siehe hierzu auch die jeweiligen Kapitel).

Ein weiterer Schwerpunkt der Anpassung liegt auf Bekämpfung der Ausbreitung von vektor- und wasserübertragenen Krankheiten. Hier bieten sich als öffentliche Maßnahmen Melderegister und Frühwarnsysteme an, die bereits heute eingerichtet werden können, wobei dies eher auf Bundesebene sinnvoll ist. Die Maßnahmen zur Frühwarnung und Information können verhältnismäßig kurzfristig umgesetzt werden und zeigen bereits bei heute eintretenden Ereignissen eine Wirkung (No-Regret).

Die vorhandenen ökonomischen Studien beziehen sich meist auf Daten des Hitzeereignisses im Sommer 2003. Aus ökonomischer Sicht sind die meisten Maßnahmen im Handlungsfeld Menschliche Gesundheit mit einem günstigen Nutzen-Kosten-Verhältnis verbunden und damit zu empfehlen. Dies ist auf relativ geringe Kosten für Informations-, Melde- und Monitoringsysteme und hohe Nutzen für den Schutz des menschlichen Lebens zurückzuführen. Darüber hinaus ist die Gewährleistung der Gesundheitsversorgung der Bevölkerung eine öffentliche Aufgabe und viele Maßnahmen liegen in der Verantwortung der öffentlichen Hand.

#### **4.2.7 Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst**

Der Katastrophenschutz ist eine Querschnittsaufgabe und bündelt diverse Themen wie Hochwasserschutz, Gesundheit und kritische Infrastrukturen. Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass Frühwarnsysteme sowohl für Sturzfluten, Hitzewellen als auch Tornados eines der effizientesten Mittel zur Schadensvermeidung und Rettung von Menschenleben darstellen. Für den Bereich der Sturmfluten scheint Hamburg bereits gut gerüstet. Allerdings bleibt hier – ebenso wie für andere Bereiche – zu überprüfen, ob zukünftig Ereignisse möglich scheinen, die die derzeitigen Kapazitäten im Falle ihres Eintritts überfordern würden. Solche Ereignisse

sind häufig mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden. Daher ist die bundesweite Zusammenarbeit und Koordination sinnvoll, so dass im Ernstfall Kräfte gebündelt werden können. Weiterhin sollten Möglichkeiten zur Verbesserung bestehender Frühwarnsysteme (z.B. Katwarn) untersucht werden. Dies schließt auch eine Erhöhung des Risikobewusstseins der Bevölkerung und die Information über bestehende Systeme ein.

Die Fallstudie zum Starkregenereignis im Juni 2011 in Hamburg hat gezeigt, dass die bestehenden Kapazitäten der Abwassersysteme nicht immer ausreichend sind, um solche Wassermengen zügig abzuleiten. Darüber hinaus sind öffentliche und private Gebäude und öffentliche Infrastruktureinrichtungen in den meisten Fällen nicht gegen einströmendes Wasser gesichert. Somit kann ein Starkregenereignis hohe direkte und indirekte Schäden verursachen.

Die Schadenskosten müssen Privatpersonen in der Regel selbst tragen. Nur in seltenen Fällen ist eine Elementarschadensversicherung abgeschlossen, die diese Kosten übernimmt. Hier sollte also ein Anreiz für die Anpassung von Gebäuden bestehen, sofern der dadurch in Zukunft vermiedene Schaden die Kosten für die Maßnahmen übersteigt. Von staatlicher Seite können durch Informationsangebote zu den erwarteten Änderungen von Extremereignissen, zu Risikogebieten und Möglichkeiten zur Anpassung die Anreize für privates Handeln erhöht werden.

Auf der anderen Seite kann die Gefahr von Überflutungen von staatlicher Seite großflächig zum Beispiel durch die Entsiegelung von Flächen oder die Renaturierung von Wasserläufen vermieden werden. Dies würde im Einzelfall die private Anpassung redundant machen bzw. den Netto-Nutzen der Anpassung reduzieren. Damit stellt sich die Frage, wer die Kosten der Anpassung letztendlich tragen soll. Dazu empfiehlt sich eine klare Kommunikation und Information der Anwohner und der ansässigen Betriebe über die Möglichkeiten zur Vermeidung zukünftiger Schäden. Eine (Kosten-) Beteiligung der Gebäudeeigentümer im Risikogebiet an großräumigen Maßnahmen kann dann im Einzelfall sinnvoll sein und für alle Beteiligten einen hohen Netto-Nutzen hervorbringen.

### **4.3 Ausblick**

Anpassung an den Klimawandel ist ein dynamischer Prozess unter hohen Unsicherheiten. Als zentrales Element für das Handeln des öffentlichen Sektors folgt daraus die Kurzformel: „Klimaanpassung mitdenken“, d.h. vor allem eine Integration von Klimafolgen in anstehende Entscheidungen und die Nutzung von Nebeneffekten, die bereits heute Nutzen aufweisen. Dabei ist vor allem die Informationsvermittlung und -bereitstellung sowohl innerhalb der öffentlichen Institutionen als auch gegenüber der Bevölkerung oder Unternehmen eine öffentliche Aufgabe, die für einen integrierten Ansatz unabdingbar ist. Die Hamburger Anpassungsstrategie kann hierzu einen Beitrag leisten, indem sie nicht nur systematisch unsere allgemeinen Empfehlungen aufgreift, sondern auch verstärkt Zuständigkeiten und Koordinations- beziehungsweise Kooperationserfordernisse in den Blick nimmt. Dann kann es auch gelingen, mit der Hamburger Anpassungsstrategie als ersten Schritt die Freie und Hansestadt Hamburg angemessen auf den Klimawandel einzustellen.

## Quellenverzeichnis

- Altvater, S.; Bouwma, I.; de Block, D.; Dworak, T.; Freluh-Larsen, A.; Görlach, B.; Hermeling, C.; Klostermann, J.; König, M.; Leitner, M.; Marinova, N.; McCallum, S.; Naumann, S.; Osberghaus, D.; Prutsch, A.; Reif, C.; van de Sandt, K.; Swart, R.; Tröltzsch, J. (2012): Adaptation Measures in the EU: Policies, Costs, and Economic Assessment. Im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Klima.  
[http://ecologic.eu/files/attachments/Publications/2012/altvater\\_12\\_climate\\_proofing\\_report\\_2.pdf](http://ecologic.eu/files/attachments/Publications/2012/altvater_12_climate_proofing_report_2.pdf), (Download am 25.05.2012).
- Dannenberg, A., Mennel, T., Osberghaus, D., Sturm, B. (2009): The Economics of Adaptation to Climate Change – The Case of Germany. Discussion Paper No. 09-057, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim.
- De Bruin, K., R. B. Dellink, A. Ruijs, L. Bolwidt, A. van Buuren, J. Graveland, R. S. de Groot, P. J. Kuikman, S. Reinhard, R. P. Roetter, V. C. Tassone, A. Verhagen, E. C. van Ierland (2009): Adapting to climate change in The Netherlands: an inventory of climate adaptation options and ranking of alternatives. *Climatic Change*, Vol. 95, Nr. 1-2, 23-45.
- Dehnhardt, A.; Hirschfeld, J.; Drünkler, D., Peschow, U., Engel, H.; Hammer, M. (2008): Kosten-Nutzen-Analyse von Hochwasserschutzmaßnahmen. Herausgegeben durch Umweltbundesamt, Dessau.
- De Kok, J.-L., Grossmann, M. (2009): Large-scale Assessment of Flood Risk and the Effects of Mitigation Measures along the River Elbe. *Natural Hazards*, Nr. 52, 143-166.
- Dyckhoff, H.; Ahn, H. (2002): Kosten-Nutzen-Analyse, in: Küpper, H.U.; Wagenhofer, A. (Hrsg.) (2002): Handwörterbuch Unternehmensrechnung und Controlling. Stuttgart.
- Flörke, M.; Wimmer, F.; Laaser, C.; Vidaurre, R.; Tröltzsch, J.; Dworak, T.; Stein, U.; Marinova, N.; Jaspers, F.; Ludwig, F.; Swart R.; Giupponi, C.; Bosello, F.; Mysiak, J. (2011): Climate Adaptation – modelling water scenarios and sectoral impacts. Final Report, im Auftrag der EU Kommission, GD Umwelt. Online verfügbar unter [http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework\\_directive/climate\\_adaptation/climwatadapt\\_report/proofread\\_climwatadapt/\\_EN\\_1.2\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/climate_adaptation/climwatadapt_report/proofread_climwatadapt/_EN_1.2_&a=d), (Download am 15.5.2012).
- Gerstengarbe, F.-W. et al. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report, Nr. 83. Online verfügbar unter: <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr83.pdf>, (Download am 20.8.2011).
- Hallegatte, S. (2008): An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. *Risk Analysis* 25 (3), 779-799.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., Wood, R. M. (2011): Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change*, Vol. 104, Nr. 1, 113-137.
- Hübler, M., Klepper, G. (2007): Kosten des Klimawandels: Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: <http://www.ifwmembers.ifw-kiel.de/publications/2kosten-des-klimawandels-die-wirkung-steigendertemperaturen-auf-gesundheit-und-leistungsfahigkeit>, (Download am 12.1.2011).
- IEEP (2012) Methodologies for climate proofing investments and measures under cohesion and regional policy and the common agricultural policy. Final Report, im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Klima.
- Kemfert, C.; Kremers, H. (2009): The Cost of Climate Change to the German Fruit Vegetation Sector. DIW Discussion Paper 857. Berlin.

- Mahrenholz, P.; Vetter, A.; Schauser, I.: Bewertung von Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an Klimawandel. Präsentation auf dem Workshop: Ökonomische Aspekte der Anpassung an den Klimawandel, Berlin, 19.01.2012, Online verfügbar unter: [http://www.anpassung.net/clin\\_108/nn\\_2244204/DE/Anpassungsstrategie/Veranstaltungen/Workshopreihe\\_20\\_C3\\_96konomie/erster\\_20Workshop/Download/Pr\\_C3\\_A4sentation\\_2001,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Pr%C3%A4sentation%2001.pdf](http://www.anpassung.net/clin_108/nn_2244204/DE/Anpassungsstrategie/Veranstaltungen/Workshopreihe_20_C3_96konomie/erster_20Workshop/Download/Pr_C3_A4sentation_2001,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Pr%C3%A4sentation%2001.pdf), (Download am 12.7.2012).
- Nickel, D.; Blobel, D. (2010): Möglichkeiten der Priorisierung von Maßnahmenvorschlägen für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel. Welche Informationen können aus der Maßnahmenumfrage gewonnen werden? Erstellt im Rahmen des UBA-Projektes „Auswertung von Anpassungsprojekten“, FKZ 3709 41 120.
- Pietsch, G. (2003): Reflexionsorientiertes Controlling. Wiesbaden.
- Schönthaler, K., von Andrian-Werburg, S., Nickel, D. (2011), Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS), Climate change UBA 22/2011. Online verfügbar unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4230.html> (Download am 15.5.2012).
- Schuchardt, B., Wittig, S., Spiekermann, J. (2011): Klimawandel in der Metropolregion Bremen-Oldenburg – Regionale Analyse der Vulnerabilität ausgewählter Sektoren und Handlungsbereiche, 11. Werkstattbericht nordwest2050, Bremen Juni 2011, Online verfügbar unter [http://www.nordwest2050.de/index\\_nw2050.php?obj=file&aid=8&id=272&unid=2289d5e24a884015dd25e78ada6be654](http://www.nordwest2050.de/index_nw2050.php?obj=file&aid=8&id=272&unid=2289d5e24a884015dd25e78ada6be654), (Download am 17.5.2012).
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M., Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau.
- Umweltbundesamt (2007): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden - Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten, Dessau.
- Van Ierland, E.C., de Bruin, K., Dellink, R.B., Ruijs, A. (2007): A qualitative assessment of climate adaptation options and some estimates of adaptation costs. Routeplanner Report 3.
- Wurm, S.; Blobel, D.; Nickel, D. (2010): Konzept für die Durchführung eines Wettbewerbs Klimaanpassung. Erstellt im Rahmen des UBA-Projektes „Auswertung von Anpassungsprojekten“, FKZ 3709 41 120.
- Zebisch, M. et al. (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt, UBA-Texte Climate Change 08/2005, Dessau.