

Guy Brasseur
Daniela Jacob
Susanne Schuck-Zöller
(Hrsg.)

Klimawandel in Deutschland

Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
	<i>Guy Brasseur, Paul Becker, Martin Claußen, Daniela Jacob, Hans-Joachim Schellnhuber, Susanne Schuck-Zöller</i>	
	Literatur	4
I	Globale Klimaprojektionen und regionale Projektionen für Deutschland und Europa	
2	Globale Sicht des Klimawandels	7
	<i>Hauke Schmidt, Veronika Eyring, Mojib Latif, Diana Rechid, Robert Sausen</i>	
2.1	Geschichte der Klimamodellierung	8
2.2	Komponenten des Klimasystems, Prozesse und Rückkopplungen	8
2.3	Ensembles von Klimamodellen und Szenarien	10
2.3.1	Beschreibung der Szenarien	11
2.4	IPCC-Bericht: Fortschritte und Schlüsselergebnisse	11
2.4.1	Simulation des historischen Klimawandels	11
2.4.2	Projektionen des zukünftigen Klimas	13
2.5	Kurz gesagt	15
	Literatur	15
3	Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland	17
	<i>Frank Kaspar, Hermann Mächel</i>	
3.1	Einleitung	18
3.2	Beobachtung des Klimawandels in Deutschland	18
3.2.1	Geschichte der Wetterbeobachtung in Deutschland	18
3.2.2	Das aktuelle Stationsmessnetz in Deutschland	19
3.2.3	Die Beobachtung wichtiger Klimagrößen im Einzelnen	19
3.2.4	Klimatrends in Deutschland und den Bundesländern	21
3.3	Datensätze für Deutschland und Europa	21
3.3.1	Stationsdaten	21
3.3.2	Gerasterte Datensätze	23
3.4	Kurz gesagt	24
	Literatur	24
4	Regionale Klimamodellierung	27
	<i>Daniela Jacob, Christoph Kottmeier, Juliane Petersen, Diana Rechid, Claas Teichmann</i>	
4.1	Methoden der regionalen Klimamodellierung	28
4.1.1	Dynamische Regionalisierung	28
4.1.2	Statistische Regionalisierung	28
4.2	Bestandteile regionaler Klimamodelle	29
4.3	Modellvalidierung und Evaluierung des Referenzklimas	30
4.4	Ensemble und Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen	31
4.5	Projizierte Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im 21. Jahrhundert	31
4.6	Kurz gesagt	32
	Literatur	33
5	Grenzen und Herausforderungen der regionalen Klimamodellierung	37
	<i>Andreas Dobler, Hendrik Feldmann, Uwe Ulbrich</i>	
5.1	Anforderungen an Modelle	38
5.2	Robustheit der Ergebnisse aus der regionalen Klimamodellierung	39
5.3	Erzeugung und Interpretation von Ensembles	40

5.4 Mehrwert der regionalen Modellierung 41
 5.5 Kurz gesagt 42
 Literatur 43

II Klimawandel in Deutschland: regionale Besonderheiten und Extreme

6 **Temperatur inklusive Hitzewellen** 47
Thomas Deutschländer, Hermann Mächel

6.1 **Beobachtete Temperaturänderungen** 48
 6.1.1 Klimatologische Kenntage und Quantile 48
 6.2 **Zukunftsprojektionen** 51
 6.2.1 Klimatologische Kenntage 51
 6.2.2 Prozentuale Schwellenwerte und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten 53
 6.2.3 Monatliche und saisonale Extreme 53
 6.3 **Kurz gesagt** 55
 Literatur 55

7 **Niederschlag** 57
Michael Kunz, Susanna Mohr, Peter Werner

7.1 **Starkniederschläge** 58
 7.1.1 Beobachtete Änderungen in der Vergangenheit 58
 7.1.2 Änderungen in der Zukunft 60
 7.2 **Hagel** 61
 7.2.1 Hagelwahrscheinlichkeit und Änderungen in der Vergangenheit 61
 7.2.2 Zukunftsszenarien 63
 7.3 **Schnee** 63
 7.3.1 Änderung der Schneedecke in der Vergangenheit 64
 7.3.2 Änderungen in der Zukunft 64
 7.4 **Kurz gesagt** 64
 Literatur 64

8 **Winde und Zyklonen** 67
Joaquim G. Pinto, Mark Meyers

8.1 **Gegenwärtiges Klima und beobachtete Trends** 68
 8.2 **Trends im zukünftigen Klima** 69
 8.3 **Kurz gesagt** 73
 Literatur 73

9 **Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang** 77
Ralf Weiße, Insa Meinke

9.1 **Nordsee** 78
 9.1.1 Mittlerer Meeresspiegel 78
 9.1.2 Meteorologisch verursachte Wasserstandsänderungen 78
 9.1.3 Gezeiten 79
 9.2 **Ostsee** 80
 9.2.1 Mittlerer Meeresspiegel 80
 9.2.2 Ostseesturmfluten 82
 9.3 **Kurz gesagt** 83
 Literatur 83

10	Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland	87
	<i>Axel Bronstert, Helge Bormann, Gerd Bürger, Uwe Haberlandt, Fred Hattermann, Maik Heistermann, Shaochun Huang, Vassilis Kolokotronis, Zbigniew Kundzewicz, Lucas Menzel, Günter Meon, Bruno Merz, Andreas Meuser, Eva Nora Paton, Theresia Petrow</i>	
10.1	Hochwasser in Flussgebieten der Mesoskala	88
10.1.1	Ergebnisse für Deutschland insgesamt	88
10.1.2	Ergebnisse für Flussgebiete in Südwest- und Süddeutschland	91
10.1.3	Ergebnisse für den Rhein	92
10.1.4	Ergebnisse für das obere Elbegebiet	94
10.1.5	Ergebnisse für das Weser- und Emsgebiet	96
10.2	Sturzfluten und Extremniederschläge kurzer Dauer	97
10.2.1	Spezifika von Sturzfluten	97
10.2.2	Datenanalyse zur Entwicklung von hochintensiven Starkregenereignissen	98
10.2.3	Zur künftigen Entwicklung von hoch intensiven Starkregenereignissen	99
10.3	Kurz gesagt	99
	Literatur	100
11	Exkurs: Unsicherheiten bei der Analyse und Attribution von Hochwasserereignissen	103
	<i>Manfred Mudelsee</i>	
11.1	Elbehochwasser	104
11.2	Unsicherheiten bei der statistischen Analyse von Ereignissen in der Vergangenheit	105
11.3	Unsicherheiten bei der statistischen Analyse von Projektionen in die Zukunft	107
11.4	Unsicherheitsreduzierung durch intelligentes Fragen	108
11.5	Kurz gesagt	108
	Literatur	109
12	Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren	111
	<i>Thomas Glade, Peter Hoffmann, Kirsten Thonicke</i>	
12.1	Dürre	112
12.1.1	Einordnung vergangener Ereignisse	112
12.1.2	Projektionen	113
12.2	Waldbrand	113
12.2.1	Bestandsaufnahme	113
12.2.2	Projektionen	114
12.2.3	Perspektiven	114
12.3	Gravitative Massenbewegungen	115
12.3.1	Felsstürze	115
12.3.2	Muren	116
12.3.3	Rutschungen	116
12.4	Kryosphäre	117
12.4.1	Auftauender Permafrost	117
12.4.2	Glaziale Systeme	118
12.4.3	Schneelawinen	118
12.5	Ausblick	118
12.6	Kurz gesagt	119
	Literatur	119
III	Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland	
13	Luftqualität	127
	<i>Martin G. Schultz, Dieter Klemp, Andreas Wahner</i>	
13.1	Physikalische und chemische Grundlagen	128
13.2	Entwicklung der Luftverschmutzung in Deutschland seit 1990	129

13.3	Zukünftige Entwicklung der Luftqualität	131
13.4	Kurz gesagt	135
	Literatur	135
14	Gesundheit	137
	<i>Jobst Augustin, Rainer Sauerborn, Katrin Burkart, Wilfried Endlicher, Susanne Jochner, Christina Koppe, Annette Menzel, Hans-Guido Mücke, Alina Herrmann</i>	
14.1	Überblick	138
14.2	Direkte Auswirkungen	138
14.2.1	Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch thermische Belastung	138
14.2.2	Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch UV-Strahlung	139
14.3	Indirekte Auswirkungen	141
14.3.1	Pollenflug und Allergien	141
14.3.2	Infektionserkrankungen	142
14.3.3	Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Luftschadstoffe	145
14.4	Synergien von Klima- und Gesundheitsschutz	146
14.5	Kurz gesagt	146
	Literatur	146
15	Biodiversität	151
	<i>Stefan Klotz, Josef Settele</i>	
15.1	Wandel der Biodiversität in Deutschland	152
15.2	Biodiversität und Klima	152
15.2.1	Der Klimawandel als Selektionsfaktor – genetische Konsequenzen	153
15.2.2	Veränderung in der Physiologie und im Lebensrhythmus von Tier und Pflanze	153
15.2.3	Veränderungen in den Verbreitungsmustern	154
15.2.4	Klimawandel und biologische Interaktionen	155
15.2.5	Biologische Invasionen	156
15.2.6	Veränderung von Ökosystemen und Konsequenzen für den Naturschutz	157
15.3	Kurz gesagt	158
	Literatur	158
16	Wasserhaushalt	161
	<i>Harald Kunstmann, Peter Fröhle, Fred F. Hattermann, Andreas Marx, Gerhard Smiatek, Christian Wanger</i>	
16.1	Wissenschaftliche Grundlagen, Methoden und Unsicherheiten der hydrologischen Klimaimpaktanalyse	162
16.2	Auswirkungen der Klimaänderung auf ausgewählte Aspekte des Wasserhaushalts	163
16.2.1	Beobachtungen	163
16.2.2	Projektionen für die Zukunft	166
16.3	Wissenschaftliche Basis und Optionen von Anpassungsmaßnahmen	169
16.4	Kurz gesagt	170
	Literatur	171
17	Biogeochemische Stoffkreisläufe	173
	<i>Nicolas Brüggemann, Klaus Butterbach-Bahl</i>	
17.1	Wald	174
17.1.1	Temperaturänderungen	174
17.1.2	Veränderte Wasserverfügbarkeit	175
17.1.3	Änderungen der Baumartenzusammensetzung	175
17.1.4	Einfluss erhöhter Stickstoffdeposition in Kombination mit dem Klimawandel	176
17.1.5	Reaktive Spurengase und ihre Rückkopplungseffekte	176
17.1.6	Austrag gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen	177
17.2	Moore	177
17.3	Küstengebiete	179
17.4	Kurz gesagt	179
	Literatur	179

18	Landwirtschaft	183
	<i>Horst Gömann, Cathleen Frühauf, Andrea Lüttger, Hans-Joachim Weigel</i>	
18.1	Einleitung	184
18.2	Agrarrelevante klimatische Veränderungen	184
18.3	Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf wichtige Kulturpflanzen	185
18.3.1	Temperaturveränderungen	185
18.3.2	Niederschlagsveränderungen	186
18.3.3	Anstieg der CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre	186
18.3.4	Interaktionen und Rückkopplungen: CO ₂ , Temperatur, Niederschlag	187
18.4	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf agrarrelevante Schadorganismen	187
18.5	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf landwirtschaftliche Nutztiere	188
18.6	Auswirkungen auf die Agrarproduktion	188
18.7	Anpassungsmaßnahmen	189
18.8	Kurz gesagt	190
	Literatur	190
19	Wald und Forstwirtschaft	193
	<i>Michael Köhl, Daniel Plugge, Martin Gutsch, Petra Lasch-Born, Michael Müller, Christopher Reyer</i>	
19.1	Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf	194
19.2	Was der Klimawandel mit dem deutschen Wald macht	195
19.2.1	Veränderte Ausbreitungsgebiete und Artenzusammensetzung	195
19.2.2	Längere Vegetationsperioden	196
19.2.3	Waldschäden: keine einfachen Antworten	196
19.2.4	Temperatur und Niederschläge beeinflussen Produktivität	198
19.2.5	Kohlenstoffhaushalt: von der Senke zur Quelle	198
19.3	Anpassung in der Forstwirtschaft	198
19.4	Kurz gesagt	199
	Literatur	200
20	Boden	203
	<i>Eva-Maria Pfeiffer, Annette Eschenbach, Jean Charles Munch</i>	
20.1	Diversität von Böden	204
20.2	Böden im Klimasystem: Funktionen und Ökosystemdienstleistungen	205
20.2.1	Folgen für die natürlichen Standortfunktionen von Böden	206
20.2.2	Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt	208
20.2.3	Böden und ihre unverzichtbaren Klimafunktionen	208
20.3	Klima- und Bodenschutz zum Erhalt der Ressource Boden	210
20.3.1	Strategien und Herausforderungen	211
20.4	Kurz gesagt	211
	Literatur	211
21	Personen- und Güterverkehr	215
	<i>Heike Flämig, Carsten Gertz, Thorsten Mühlhausen</i>	
21.1	Entwicklung der CO₂e-Emissionen im Verkehrssektor	216
21.2	Handlungsschwerpunkt Emissionsminderung im Verkehrsbereich	218
21.3	Anpassung an Folgen des Klimawandels im Verkehrsbereich	220
21.4	Kurz gesagt	222
	Literatur	222
22	Städte	225
	<i>Wilhelm Kuttler, Jürgen Oßenbrügge, Guido Halbig</i>	
22.1	Stadtklimatische Herausforderungen	226
22.1.1	Ansteigende Lufttemperaturen und thermische Belastungen	226
22.1.2	Luftinhaltsstoffe: Ozon, BVOCs und allergene Pollen	226
22.1.3	Starkniederschlagsereignisse im städtischen Bereich	228

22.2	Urbane Verwundbarkeiten	228
22.2.1	Urbane Verwundbarkeit als Problem der naturräumlichen Lage	229
22.2.2	Urbane Verwundbarkeit als Problem der baulichen Umwelt und der technischen Infrastruktur.	229
22.2.3	Urbane Verwundbarkeit als Problem der städtischen Gesundheit und Bevölkerung	229
22.3	Erfahrungen und Perspektiven einer klimaangepassten Stadtentwicklung	230
22.3.1	Beispiel für stadtklimatische Anpassungsstrategien	231
22.3.2	Städtische Klimapolitik und <i>multilevel governance</i>	231
22.4	Kurz gesagt	232
	Literatur	233
23	Tourismus	235
	<i>Andreas Matzarakis, Martin Lohmann</i>	
23.1	Tourismus in Deutschland – Überblick und Bedeutung	236
23.1.1	Klimarelevanz des Tourismus – Tourismusrelevanz des Klimas.	237
23.2	Klimawandel und Tourismus	237
23.2.1	Touristisch relevante Klimawandelfolgen	237
23.2.2	Klimawandel und touristisches Angebot	238
23.3	Konkrete Beispiele für Deutschland	238
23.3.1	Küsten	238
23.3.2	Mittel- und Hochgebirgsregionen	239
23.3.3	Spezifische Anpassungsstrategien	239
23.4	Kurz gesagt	240
	Literatur	240
24	Infrastrukturen und Dienstleistungen in der Energie- und Wasserversorgung	243
	<i>Hagen Koch, Helmut Karl, Michael Kersting, Rainer Lucas, Nicola Werbeck</i>	
24.1	Zur Verletzlichkeit des Energiesystems in Deutschland	244
24.1.1	Thermische Kraftwerke mit Wasserkühlung	245
24.1.2	Wasserkraftanlagen	245
24.1.3	Windkraftanlagen	246
24.1.4	Solarenergieanlagen	246
24.1.5	Ausblick Energiesystem	247
24.2	Wasserversorgung im klimatischen, demografischen und wirtschaftlichen Wandel	247
24.2.1	Determinanten des Wasserbedarfs	247
24.2.2	Bildung von Szenarien	247
24.2.3	Ausblick Wasserversorgung	248
24.3	Kurz gesagt	249
	Literatur	250
25	Kosten des Klimawandels und Auswirkungen auf die Wirtschaft	253
	<i>Gernot Klepper, Wilfried Rickels, Oliver Schenker, Reimund Schwarze, Hubertus Bardt, Hendrik Biebler, Mahammad Mahammadzadeh, Sven Schulze</i>	
25.1	Herausforderungen für die Quantifizierung der Kosten des Klimawandels	254
25.1.1	Wirtschaftliche Kosten und soziale Kosten	254
25.1.2	Kosten auf unterschiedlichen Zeitskalen	254
25.1.3	Systemische Wirkungen des Klimawandels	255
25.1.4	Unsicherheiten in Bezug auf Extremereignisse	255
25.1.5	Projektionen von Anpassungsreaktionen	255
25.2	Kosten des Klimawandels: Modellierungsansätze	255
25.3	Wirtschaftliche Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland	256
25.4	Abschätzung sektoraler Kosten des Klimawandels	259
25.4.1	Hochwasser- und Küstenschutz	259
25.4.2	Hitzewellen und Gesundheitskosten	260
25.5	Exkurs: Subjektive Einschätzung der Betroffenheit von Unternehmen	262
25.6	Kurz gesagt	263
	Literatur	263

IV Übergreifende Risiken und Unsicherheiten

26	Das Assessment von Vulnerabilitäten, Risiken und Unsicherheiten	267
	<i>Jörn Birkmann, Stefan Greiving, Olivia Serdeczny</i>	
26.1	Die Risikoperspektive	268
26.1.1	Risiken und mögliche Anpassungsstrategien: von zwei Seiten her denken	268
26.1.2	Vom IPCC-SREX-Spezialbericht zum Fünften IPCC-Sachstandsbericht	269
26.2	Artikel 2 der Klimarahmenkonventionen	270
26.3	Vergleich der Konzepte IPCC 2007 und IPCC 2014: internationaler und nationaler Diskurs	270
26.4	Schlüsselrisiken im Kontext des Fünften IPCC-Sachstandsberichts	272
26.4.1	Beispiele für Schlüsselrisiken	273
26.5	Bandbreiten und Unsicherheiten	273
26.6	Kurz gesagt	275
	Literatur	275
27	Analyse der Literatur zu Klimawirkungen in Deutschland: ein Gesamtbild mit Lücken	277
	<i>Mark Fleischhauer, Stefan Greiving, Christian Lindner, Johannes Lückenköter, Inke Schauer</i>	
27.1	Die Studie des Netzwerks Vulnerabilität	278
27.1.1	Auswertung nach Handlungsfeldern	278
27.1.2	Auswertung der inhaltlichen Aussagen zu den verschiedenen Handlungsfeldern	280
27.1.3	Methodische Ansätze der Vulnerabilitätsstudien	283
27.1.4	Zusammenfassung	284
27.2	Kurz gesagt	284
	Literatur	285
28	Klimawandel als Risikoverstärker in komplexen Systemen	287
	<i>Jürgen Scheffran</i>	
28.1	Das komplexe Zusammenspiel von Mensch und Umwelt	288
28.2	Wie verwundbar sind Infrastrukturen, Versorgungsnetze und Wirtschaft?	290
28.3	Umbrüche in Klima, Gesellschaft und Politik	290
28.4	Migration aus Umweltgründen	291
28.5	Konfliktpotenziale des Klimawandels	292
28.6	Kurz gesagt	293
	Literatur	293
29	Übergreifende Risiken und Unsicherheiten	295
	<i>Ortwin Renn</i>	
29.1	Bewertung von Risiken	296
29.2	Vier-Phasen-Konzept der Risikosteuerung	296
29.2.1	Vorphase: Was bedeutet die inhaltliche „Rahmung“?	296
29.2.2	Risikoerfassung: der Zusammenklang physischer und wahrgenommener Risiken	298
29.2.3	Tolerabilitäts- und Akzeptabilitätsbewertung: Welche Risiken sind zumutbar?	299
29.2.4	Risikomanagement: Wie lassen sich Wirksamkeit und demokratische Legitimation zentral nachweisen?	299
29.3	Risikowahrnehmung in der pluralen Gesellschaft	299
29.4	Schnittstelle Risikoerfassung und Risikomanagement	300
29.5	Risikokommunikation: Wie sollen und können Interessensgruppen und Bevölkerung beteiligt werden?	300
29.6	Kurz gesagt	302
	Literatur	302
30	Entscheidungen unter Unsicherheit in komplexen Systemen	305
	<i>Hermann Held</i>	
30.1	Die zentrale Entscheidungsfrage	306
30.2	Die Tradition des Utilitarismus und die Erwartungsnutzenmaximierung	307
30.3	Grenzen der Erwartungsnutzen-maximierung angesichts der Klimaproblematik	308
30.4	Mischformen probabilistischer und nichtprobabilistischer Kriterien	308
30.5	Das Konzept der starken Nachhaltigkeit: Grenzwerte und die Kosten-Effektivitäts-Analyse	309

30.6	Konsequenzen für die Interaktion von Politik und Wissenschaft	310
30.7	Kurz gesagt	311
	Literatur	311

V Integrierte Strategien zur Anpassung an den Klimawandel

31	Die klimaresiliente Gesellschaft – Transformation und Systemänderungen	315
	<i>Jesko Hirschfeld, Gerrit Hansen, Dirk Messner</i>	
31.1	Kausalzusammenhang zwischen Klimaschutz und Anpassung, Anpassungsgrenzen und Transformation	316
31.2	Globale Veränderungsprozesse und Transformation	317
31.3	Chancen und Risiken der Anpassung in komplexen Systemen	320
31.4	Kurz gesagt	321
	Literatur	321
32	Anpassung an den Klimawandel als neues Politikfeld	325
	<i>Andreas Vetter, Esther Chrischilles, Klaus Eisenack, Christian Kind, Petra Mahrenholz, Anna Pechan</i>	
32.1	Politikgestaltung im Mehrebenensystem zur Anpassung an den Klimawandel	326
32.1.1	Europäische Ebene	326
32.1.2	Bundes- und Länderebene	327
32.1.3	Kommunale Ebene	328
32.2	Ansätze und Hemmschuhe der Umsetzung geeigneter Anpassungsmaßnahmen	329
32.2.1	Politikinstrumente der Anpassung an den Klimawandel	329
32.2.2	Barrieren bei der Umsetzung	330
32.2.3	Ansatzpunkte erfolgreicher Umsetzung	331
32.3	Kurz gesagt	331
	Literatur	332
33	Optionen zur Weiterentwicklung von Anpassungsstrategien	335
	<i>Petra Mahrenholz, Jörg Knieling, Andrea Knierim, Grit Martinez, Heike Molitor, Sonja Schlipf</i>	
33.1	Ansätze für eine strategische Weiterentwicklung von Anpassung	336
33.1.1	Inkrementelle und transformative Ansätze für Anpassungsmaßnahmen	336
33.1.2	Anpassung an den Klimawandel durch governance	336
33.1.3	Partizipation	338
33.1.4	Kommunikation	339
33.2	Anpassung als soziokultureller Wandel	340
33.3	Kurz gesagt	341
	Literatur	341
	Serviceteil	345
	Glossar	346