

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung: Wohlstand, Wachstum und der Klimawandel	1
	Die ökonomischen Folgen des Klimawandels	1
	Wirtschaftliche Umwälzungen durch Skaleneffekte und Lernkurven	4
	Warum erleben nicht alle Technologien oder Branchen beeindruckende Fortschritte durch Lernkurven?	7
	Die Rolle staatlicher und privater Institutionen in der Entwicklung von Technologien	8
	Literatur	11
2	Von der Hunderte Millionen Jahre alten CO₂-Speicherung zum menschengemachten Klimawandel	13
	Seit wann wissen wir vom menschengemachten Klimawandel?	14
	Der Treibhauseffekt ist ein natürliches Phänomen, aber sein Ausmaß ist menschengemacht	15
	Woher haben fossile Brennstoffe ihren Namen?	22
	Fossile Energien sind zu günstig und werden preiswerter statt teurer	25
	Neue Märkte braucht das Land	30
	Literatur	34
3	Geothermische Energie: der schlafende Riese unter den erneuerbaren Energien	37
	Erneuerbare Energie aus dem Inneren des Planeten	38
	Was ist Geothermie?	39

v

VI Inhaltsverzeichnis

Vorteile der Geothermie für Investoren, Verbraucher und die Umwelt	40
Standorte weltweit und in Deutschland	41
Risiken der geothermischen Energie und Wege zu ihrer Überwindung	42
Der Unfall von Staufen im Breisgau	43
Das Erdbeben in Pohang	44
Das wirtschaftliche Potenzial der geothermischen Energie	47
Die Wertschöpfungskette der geothermischen Industrie	49
Geothermie als Energiespeichermöglichkeit	54
Kombination von Geothermie mit Wärmepumpen	54
Digitale Technologien	55
Synergien zwischen Regierung, Wirtschaft und Wissenschaft: Der Schlüssel zur kosteneffizienten und globalen Geothermie-Nutzung	56
Exponentielles Wachstum in der Geothermie?	58
Potenziele für Geschäftsentwicklung und Innovation	60
Methoden der Standortsuche	60
Innovationen bei Bohrtechnologien	61
Betrieb der Anlagen	63
Verbesserte Nutzung der Geothermie	65
Die Zukunft der Geothermie	66
Wann ist der richtige Zeitpunkt für den Einstieg privater Investoren?	67
Ausblick: Bringt das Jahr 2050 autonome Bohrroboter, Energiegewinnung im Einklang mit der Natur und eine Versorgung abgelegener Regionen?	68
Literatur	69
4 Biomasse, Biokraftstoffe und Biogas	73
Biomasse: die älteste Energiequelle der Menschheit	74
Holznutzung zur Bekämpfung des Klimawandels	75
Energie aus Mais, Raps und anderen Feldfrüchten	76
Energie aus Abfällen	77
Energie aus dem Meer	79
Konversion von Biomasse	82
Biomasse in Verbindung mit Kohlenstoffabscheidung und Speicherung	85
Wirtschaftliches Potenzial durch technologische Innovationen	85

	Ausblick: Rural Renaissance: Biomasse als Grundlage einer nachhaltigen Zukunft für alle	89
	Literatur	90
5	Die drei Säulen der Sonnenenergie: Photovoltaik, Photothermie und Concentrated Solar Power	93
	Arten von Solarenergie	94
	Die Entwicklung der PV: Von teuer zu billig	94
	Globale Unterschiede der Effizienz der Photovoltaik	96
	Hochleistungs-Solarmodule für die gewerbliche Anwendung	101
	Überwachungssysteme	105
	Wirtschaftliches Potenzial durch technologische Innovationen	106
	Agri-PV	109
	PV in der modernen Architektur	111
	Floating PV auf dem Wasser	113
	Maximum Power Point Tracking (MPPT)	116
	Verunreinigung von Solarmodulen	117
	Trackinglösungen	119
	Photovoltaisch-thermische (PVT) Systeme	120
	Recycling	121
	Photothermie	122
	Concentrated Solar Power (CSP)	124
	Geschäftsmodelle für Start-ups, Investoren und Konzerne	128
	Ausblick: Die Kraft der Sonne – Mobilisierung des Potenzials der PV in Wüstengebieten	130
	Literatur	131
6	Windenergie	137
	Die am schnellsten wachsende erneuerbare Energiequelle an Land und auf See	138
	GROWIAN-ein verkanntes Pionierprojekt mit großer Wirkung	139
	Windenergie an Land und auf See, im äußersten Süden und in Wüsten	140
	Technologietrends	145
	Welche Länder und Unternehmen führen bei der Windenergie?	147
	Wirtschaftliches Potenzial durch technologische Innovationen	149
	Geschäftsmodelle für Start-ups, Investoren und Konzerne	152
	Potenzielle zukünftige Geschäftsmodelle	154

VIII Inhaltsverzeichnis

	Ausblick: Die Umgestaltung der Meere: Eine Welt der nachhaltigen Energie- und Nahrungsmittelproduktion	154
	Literatur	156
7	Wasserkraft und Meeresenergie	159
	Wasserkraft: eine Energiequelle mit Geschichte	160
	Speicherkraftwerke, Pumpspeicher, Laufwasserkraftwerke und Mehrzweckstaudämme	161
	Perspektive der Wasserkraft in einer Welt zunehmender intermittierender Energien	163
	Finanzielle Anreize für Pumpspeicherkraftwerke	165
	Wirtschaftliches Potenzial der Wasserkraft durch technologische Innovationen	165
	Ausblick: Eine durch Wasserkraft und nachhaltige Wassersysteme geeinte Welt	169
	Die Kraft des Meeres als Strom- und Antriebsquelle	171
	Wasserturbinen	174
	Flutanlagen	176
	Wellenkraftwerke	176
	OTEC-Systeme	177
	Herausforderungen der Meeresenergie	178
	Evolution vom kleinskaligem Energy Harvesting zu großflächigen Meeresenergieanlagen	180
	Ansätze zur technologischen Weiterentwicklung	181
	Wirtschaftliche Chancen der Meeresenergie für Start-ups, Investoren und Großunternehmen	182
	Ausblick: Meeresenergie – die unsichtbare erneuerbare Energie für den Erhalt wertvoller Küstenlandschaften und historischer Stadtbilder	183
	Literatur	185
8	Regelkraftwerke und netzgekoppelte Speicherung	189
	Speicherung und Verwandlung von elektrischer Energie	190
	Kosteneffizienz und wirtschaftlicher Betrieb von Energiespeichersystemen	192
	Heutige Energiespeicher	194
	Mechanische Speicher	196
	Elektrochemische Speicher (Batterien)	200
	Redox-Flow-Batterien	201
	Fortgeschrittene Batteriemanagement- und Energiemanagementsysteme	205

Elektrostatische und elektromagnetische Speicher	206
Thermische Speicher	208
Ansatzpunkte für eine technologische Weiterentwicklung	209
Ausblick: Energiespeicherung und Steuerung transformieren das Energiesystem	210
Literatur	212
9 Geographische Herausforderungen und Innovationen in der Energieübertragung	217
Energieerzeugung und -transport: Ein Wandel von Nachbarschaft und Distanz	218
Effizienter Energietransport durch Pipelines	222
H ₂ -Transport mit Eisenbahn und Schiffen	223
Stromleitungen	225
Frequenzstabilität im Stromnetz	230
Ansätze zur technologischen Weiterentwicklung	234
Chancen für Erfinder, Start-ups und Unternehmen	238
Ausblick: Vision 2050 – Eine Revolution in der Stromübertragung	240
Literatur	242
10 Sektorkopplung für Klimaneutralität	245
Die Rolle der Sektorkopplung in der Energiewende	246
Transformation der Wärmeenergieversorgung in Haushalten und der Industrie	247
Grundprinzipien der Wärmepumpentechnologie	248
Großwärmepumpen in der Industrie	251
Technische Innovation und Weiterentwicklung	252
Wärmepumpen, intermittierende erneuerbare Energien und die Zukunft thermischer Energiespeicherung	254
Innovationspotenzial und neue Geschäftschancen bei Wärmepumpen und Wärmespeichern	255
H ₂ als Rohstoff ersetzt fossile Brennstoffe	257
Bedeutung von H ₂	258
Erzeugung von Grünem H ₂	259
H ₂ -Transport	261
Umwandlung in Ammoniak	262
Power to Gas und Power to Liquid	264
Energieverluste bei der Verwendung von grünem H ₂ und synthetischen Kraftstoffen	266
Dekarbonisierung des Verkehrssektors	267

X Inhaltsverzeichnis

H ₂ -Tanks	269
Neue Verkehrskonzepte	270
Dekarbonisierung der produzierenden Industrie	272
Bauwirtschaft und Zementindustrie	274
Stahlindustrie	275
Chemieindustrie	276
Chancen für Erfinder, Start-ups und große Unternehmen	278
Ausblick: Die klimaneutrale Transformation im Verbund von Heizen, Verkehr und Industrie – eine Vision für das Jahr 2050	281
Literatur	284
11 Abscheidung und Nutzung von CO₂ und CH₄	291
Die Notwendigkeit der CO ₂ -Abscheidung	292
Natürliche Methoden zur CO ₂ -Abscheidung	293
Sümpfe und Feuchtgebiete als Kohlenstoffspeicher	294
Aufforstung und CO ₂ -senkende Plantagen	296
Kohlenstoffspeicherung im Humus	299
Mineralisierung von CO ₂	300
Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)	301
Geschäftsmodelle des Carbon Farming	302
Was können Wissenschaftler und Forscher zu Sümpfen, Mooren und Feuchtgebieten und dem Zuwachs an Humus in den Böden beitragen?	306
Wie können Start-ups und Unternehmen von Aufforstung, Erhalt der Feuchtgebieten profitieren oder neue Sumpfgebiete und Moore schaffen?	307
Carbon Capture and Storage als technischer Prozess	309
CCS: Abscheidung von CO ₂ direkt an der Quelle	310
Pyrolyse als Alternative zu CCS	311
Perspektiven der Oxyfuel-CCS-Technologie	312
Unterirdische Speicherung	313
Ansätze zur Abscheidung oder Vermeidung von CH ₄ und N ₂ O	315
Direct Air Capture von Methan. Ist ein effizienter Ansatz möglich?	315
Emissionsquellen von CH ₄	316
Identifizierung von CH ₄ -Emissionsquellen	318
Verhinderung von CH ₄ -Emissionen	320
Methanotrophie	320

CH ₄ -Produktion in Feuchtgebieten und Mooren	322
Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Vermeidung der Emission von CH ₄ und N ₂ O	323
Ausblick: Aus Ödland werden im Jahr 2050 blühende Feuchtgebiete, Sümpfe und Moore	324
Literatur	326
12 Weiterentwicklung der Kernenergie – eine teure Investition, die alte Versäumnisse beseitigt	331
Viele relevante Länder stufen Kernenergie als einen wichtigen Lösungsweg der Klimakrise ein	332
Kernenergie: Ausnahme in der Welt des exponentiellen Wachstums klimaneutraler Energien	334
Kernenergie, die Kraft, die in winzigen Atomkernen steckt	334
Brutreaktoren	335
Thorium als Kernbrennstoff	337
Minor Actinides: radioaktive, toxische und langlebige Abfälle der Kernenergie	338
Generationen der Kernkraftwerkstechnik	338
MSR als Kernreaktoren der vierten Generation	342
Bill Gates und die Kernenergie	343
Endlagerung ist keine dauerhafte Lösung für kerntechnische Abfälle	344
Reduzierung langlebiger Isotope in Brutreaktoren	345
Spallationsquellen	346
Wasserkühlung von Kernkraftwerken	348
Ansätze zur technologischen Weiterentwicklung	350
Ausblick: Eine sichere Zukunft ohne Endlager durch Umwandlung radioaktiver Abfälle	353
Literatur	354