

---

# Inhaltsübersicht

**Mitarbeiter des Beirats und Danksagung V**

**Inhaltsübersicht VII**

**Inhaltsverzeichnis IX**

**Kästen XV**

**Tabellen XVI**

**Abbildungen XVIII**

**Akronyme XX**

**Zusammenfassung für Entscheidungsträger 1**

<b>1</b>	<b>Einleitung 13</b>
<b>2</b>	<b>Einbindung der Energiesysteme in Gesellschaft und Wirtschaft 15</b>
2.1	Einleitung 15
2.2	Globale Ausgangslage 15
2.3	Energie in den Industrieländern 19
2.4	Energie in den Entwicklungs- und Schwellenländern 24
2.5	Energie in den Transformationsländern 28
2.6	Wirtschaftliche und geopolitische Rahmenbedingungen 32
2.7	Institutionen globaler Energiepolitik 35
2.8	Vorläufiges Fazit: Ausgangslage für globale Energiepolitik 45
<b>3</b>	<b>Technologien und nachhaltige Potenziale 47</b>
3.1	Einleitung 47
3.2	Energieträger 47
3.3	Kraft-Wärme-Kopplung 79
3.4	Energieverteilung, -transport und -speicherung 81
3.5	Steigerung der Energieeffizienz 90
3.6	Kohlenstoffspeicherung („Sequestrierung“) 94
3.7	Energie für den Verkehr 98
3.8	Zusammenfassung und Bewertung 101
<b>4</b>	<b>Ein exemplarischer Pfad für eine nachhaltige Transformation der Energiesysteme 103</b>
4.1	Ansatz und Methode zur Ableitung eines exemplarischen Transformationspfads 103
4.2	Energieszenarien für das 21. Jahrhundert 104
4.3	Leitplanken für die Transformation der Energiesysteme 114

4.4	Ein exemplarischer Transformationspfad für die Energiewende zur Nachhaltigkeit	134
4.5	Diskussion des exemplarischen Pfads	140
4.6	Fazit	148
<b>5</b>	<b>Die WBGU-Transformationsstrategie: Wege zu global nachhaltigen Energiesystemen</b>	<b>151</b>
5.1	Kernelemente einer Transformationsstrategie	151
5.2	Handlungsempfehlungen für die Länderebene	151
5.3	Handlungsempfehlungen für die globale Ebene	177
<b>6</b>	<b>Forschung für die Energiewende</b>	<b>209</b>
6.1	Systemanalyse	209
6.2	Gesellschaftswissenschaftliche Forschung	211
6.3	Technologieforschung und -entwicklung	214
<b>7</b>	<b>Stationen des WBGU-Transformationsfahrplans: politische Zielgrößen, Zeitpläne und Maßnahmen</b>	<b>221</b>
7.1	Von der Vision zur Umsetzung: Gelegenheitsfenster der nächsten 10-20 Jahre nutzen	221
7.2	Natürliche Lebensgrundlagen schützen	221
7.3	Energiearmut weltweit beseitigen	225
7.4	Finanzmittel für die globale Energiewende mobilisieren	227
7.5	Modellprojekte als strategischen Hebel nutzen und Energiepartnerschaften eingehen	228
7.6	Forschung und Entwicklung vorantreiben	229
7.7	Institutionen globaler Energiepolitik bündeln und stärken	230
7.8	Fazit: Politische Gestaltungsaufgabe jetzt wahrnehmen	230
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>233</b>
<b>9</b>	<b>Glossar</b>	<b>247</b>
<b>10</b>	<b>Index</b>	<b>255</b>

---

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Mitarbeiter des Beirats und Danksagung</b>	<b>V</b>
	<b>Inhaltsübersicht</b>	<b>VII</b>
	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
	<b>Kästen</b>	<b>XV</b>
	<b>Tabellen</b>	<b>XVI</b>
	<b>Abbildungen</b>	<b>XVIII</b>
	<b>Akronyme</b>	<b>XX</b>
	<b>Zusammenfassung für Entscheidungsträger</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Einbindung der Energiesysteme in Gesellschaft und Wirtschaft</b>	<b>15</b>
2.1	Einleitung	15
2.2	Globale Ausgangslage	15
2.2.1	Zunehmende Energie- und Kohlenstoffproduktivität – Trends bis 2020	15
2.2.2	Energienutzung in Sektoren	16
2.2.3	Lebensstile und Energieeinsatz	18
2.3	Energie in den Industrieländern	19
2.3.1	Struktur der Energieversorgung	19
2.3.2	Grundlagen und Ziele der Energiepolitik	21
2.3.3	Liberalisierung der Märkte für leitungsgebundene Energieversorgung	22
2.3.4	Erneuerbare Energien in den Industrieländern	24
2.4	Energie in den Entwicklungs- und Schwellenländern	24
2.4.1	Struktur der Energieversorgung	24
2.4.2	Trends der sektoralen Energienachfrage	27
2.5	Energie in den Transformationsländern	28
2.5.1	Energienutzung	28
2.5.2	Trends in der sektoralen Energienachfrage	29
2.5.3	Subventionierung als Ursache ineffizienter Energienutzung	30
2.5.4	Privatisierung, Liberalisierung und (Re-)Regulierung der Energiewirtschaft	31

2.6	Wirtschaftliche und geopolitische Rahmenbedingungen	32
2.6.1	Globalisierung als neue Rahmenbedingung energiepolitischen Handelns	32
2.6.2	Geopolitik	33
2.7	Institutionen globaler Energiepolitik	35
2.7.1	Wissensbasis	35
2.7.2	Organisation	37
2.7.2.1	Politische Zieldeklarationen	37
2.7.2.2	Internationale Verträge	38
2.7.2.3	Operative und koordinierende Tätigkeiten internationaler Organisationen	40
2.7.3	Finanzierungsstrukturen	41
2.7.4	Fragmentierte Ansätze einer globalen Energiepolitik	45
2.8	Vorläufiges Fazit: Ausgangslage für globale Energiepolitik	45
<b>3</b>	<b>Technologien und nachhaltige Potenziale</b>	<b>47</b>
3.1	Einleitung	47
3.2	Energieträger	47
3.2.1	Fossile Brennstoffe	47
3.2.1.1	Potenziale	47
3.2.1.2	Technik / Konversion	49
3.2.1.3	Umwelt- und Sozialfolgen	50
3.2.1.4	Bewertung	52
3.2.2	Kernenergie	52
3.2.2.1	Potenziale	52
3.2.2.2	Technik / Konversion	53
3.2.2.3	Umwelt- und Sozialfolgen	54
3.2.2.4	Bewertung	56
3.2.3	Wasserkraft	56
3.2.3.1	Globale Potenziale	56
3.2.3.2	Technik	56
3.2.3.3	Umwelt- und Sozialfolgen	57
3.2.3.4	Bewertung	60
3.2.4	Bioenergie	60
3.2.4.1	Potenziale moderner Bioenergie	60
3.2.4.2	Umwelt- und Sozialfolgen traditioneller Biomassenutzung in Entwicklungsländern	66
3.2.4.3	Bewertung	66
3.2.5	Windenergie	67
3.2.5.1	Potenziale	67
3.2.5.2	Technik / Konversion	68
3.2.5.3	Umwelt- und Sozialfolgen	69
3.2.5.4	Bewertung	69
3.2.6	Solarenergie	70
3.2.6.1	Potenziale	70
3.2.6.2	Technik / Konversion	70
3.2.6.3	Umwelt- und Sozialfolgen	76
3.2.6.4	Bewertung	76
3.2.7	Erdwärme	77
3.2.7.1	Potenziale	77
3.2.7.2	Technik / Konversion	77
3.2.7.3	Umwelt- und Sozialfolgen	78
3.2.7.4	Bewertung	78
3.2.8	Andere erneuerbare Energien	78

3.3	Kraft-Wärme-Kopplung	79
3.3.1	Technologie und Effizienzpotenziale	79
3.3.2	Einsatzmöglichkeiten	79
3.3.3	Wirtschaftlichkeit	80
3.3.4	Bewertung	81
3.4	Energieverteilung, -transport und -speicherung	81
3.4.1	Grundlegende Eigenschaften von Elektrizitätsversorgungsstrukturen	81
3.4.2	Versorgungsstrategien für Elektrizitätsinseln	82
3.4.3	Versorgungsstrategien innerhalb von Elektrizitätsnetzen	82
3.4.3.1	Die fluktuierende Energienachfrage in Elektrizitätsnetzen	82
3.4.3.2	Das fluktuierende Energieangebot aus erneuerbaren Energiequellen	83
3.4.3.3	Strategien zur Abstimmung von Energieangebot und -nachfrage	83
3.4.4	Wasserstoff	85
3.4.4.1	Grundlagen	85
3.4.4.2	Herstellung	85
3.4.4.3	Speicherung und Verteilung	86
3.4.4.4	Nutzung von Wasserstoff	87
3.4.4.5	Potenzielle Umweltschädigungen durch Wasserstoff	88
3.4.5	Elektrizität versus Wasserstoff: Bewertung	89
3.5	Steigerung der Energieeffizienz	90
3.5.1	Effizienzsteigerungen in Industrie und Gewerbe	90
3.5.2	Effizienzsteigerungen und Solarenergienutzung in Gebäuden	92
3.6	Kohlenstoffspeicherung („Sequestrierung“)	94
3.6.1	Technisches Kohlenstoffmanagement	94
3.6.2	Potenziale der Speicherung als Biomasse	96
3.6.3	Bewertung	98
3.7	Energie für den Verkehr	98
3.7.1	Technologieoptionen für den Straßentransport	98
3.7.2	Effizienzgewinne durch Informationstechnologie und Raumplanung	99
3.7.3	Nachhaltigkeit und externe Effekte des erhöhten Energiebedarfs für den Transport	100
3.7.4	Bewertung	100
3.8	Zusammenfassung und Bewertung	101
<b>4</b>	<b>Ein exemplarischer Pfad für eine nachhaltige Transformation der Energiesysteme</b>	<b>103</b>
4.1	Ansatz und Methode zur Ableitung eines exemplarischen Transformationspfads	103
4.2	Energieszenarien für das 21. Jahrhundert	104
4.2.1	SRES-Szenarien als Ausgangsbasis	104
4.2.2	Grundannahmen der SRES-Szenarien	106
4.2.3	Emissionen in den SRES-Szenarien	107
4.2.4	IPCC-Klimaschutzszenarien („Post-SRES“-Szenarien)	108
4.2.5	Technologiepfade in der A1-Welt	108
4.2.5.1	Vergleich der Energiestrukturen und Klimaschutzstrategien	108
4.2.5.2	Rolle der Kohlenstoff-Speicherung	110
4.2.5.3	Vergleich der Kosten	110
4.2.5.4	Umweltauswirkungen	112
4.2.6	Auswahl eines Szenarios zur Entwicklung eines exemplarischen Pfads	112

4.3	Leitplanken für die Transformation der Energiesysteme	114
4.3.1	Ökologische Leitplanken	114
4.3.1.1	Schutz der Biosphäre	114
4.3.1.2	Klimaschutzfenster	114
4.3.1.3	Nachhaltige Flächennutzung	120
4.3.1.4	Biosphärenschtutz in Flüssen und ihren Einzugsgebieten	122
4.3.1.5	Schutz der Meeresökosysteme	123
4.3.1.6	Schutz der Atmosphäre vor Luftverschmutzung	124
4.3.2	Sozioökonomische Leitplanken	124
4.3.2.1	Schutz der Menschenrechte	124
4.3.2.2	Zugang zu moderner Energie	125
4.3.2.3	Individueller Mindestbedarf an Energie	126
4.3.2.4	Anteil der Energieausgaben am Einkommen	128
4.3.2.5	Gesamtwirtschaftlicher Mindestentwicklungsbedarf	129
4.3.2.6	Technologierisiken	131
4.3.2.7	Gesundheitsfolgen der Energienutzung	132
4.4	Ein exemplarischer Transformationspfad für die Energiewende zur Nachhaltigkeit	134
4.4.1	Ansatz und Methode	134
4.4.2	Modifikation des Szenarios A1T-450 zum exemplarischen Pfad	134
4.4.3	Der TechnologiemiX des exemplarischen Pfads im Überblick	137
4.4.4	Fazit: Die globale Energiewende ist möglich	138
4.5	Diskussion des exemplarischen Pfads	140
4.5.1	Das MIND-Modell	140
4.5.2	Der exemplarische Pfad: Bedeutung, Unsicherheiten und Kosten	145
4.5.2.1	Unsicherheiten bei den erlaubten Emissionsmengen	145
4.5.2.2	Kosten des exemplarischen Transformationspfads und Finanzierbarkeit	146
4.6	Fazit	148
<b>5</b>	<b>Die WBGU-Transformationsstrategie: Wege zu global nachhaltigen Energiesystemen</b>	<b>151</b>
5.1	Kernelemente einer Transformationsstrategie	151
5.2	Handlungsempfehlungen für die Länderebene	151
5.2.1	Ökologische Finanzreformen	152
5.2.1.1	Internalisierung externer Kosten bei fossiler und nuklearer Energie	153
5.2.1.2	Abbau von Subventionen für fossile und nukleare Energie	154
5.2.1.3	Fazit	156
5.2.2	Fördermaßnahmen	156
5.2.2.1	Förderung erneuerbarer Energien	156
5.2.2.2	Förderung fossiler Energien mit verringerten Emissionen	161
5.2.2.3	Förderung der Effizienz bei der Bereitstellung, Verteilung und Nutzung von Energie	162
5.2.2.4	Fazit	166
5.2.3	Moderne Energieformen und effizientere Energienutzung in Entwicklungs-, Transformations- und Schwellenländern	166
5.2.3.1	Die Grundidee	166
5.2.3.2	Konkrete Schritte auf der Angebotsseite	167
5.2.3.3	Konkrete Schritte auf der Nachfrageseite	170
5.2.3.4	Fazit	173
5.2.4	Flankierende Maßnahmen in anderen Politikbereichen	173
5.2.4.1	Klimapolitik	174
5.2.4.2	Verkehr und Raumordnung	175

---

5.2.4.3	Landwirtschaft	176
5.2.4.4	Fazit	177
5.3	Handlungsempfehlungen für die globale Ebene	177
5.3.1	Ausbau der internationalen Strukturen für Forschung und Beratung im Energiebereich	178
5.3.2	Institutionelle Verankerung globaler Energiepolitik	179
5.3.2.1	Funktionen internationaler Institutionen	180
5.3.2.2	Entwicklung einer Weltenergiecharta	181
5.3.2.3	Auf dem Weg zu einer „Internationalen Agentur für nachhaltige Energie“	181
5.3.3	Finanzierung der globalen Energiewende	185
5.3.3.1	Prinzipien einer gerechten und effizienten Finanzierung globaler Energiepolitik	185
5.3.3.2	Aufbringung neuer und zusätzlicher Finanzmittel	187
5.3.3.3	Verwendung der Mittel für die Energiewende durch internationale Finanzinstitutionen	192
5.3.4	Ausrichtung der internationalen Klimaschutzpolitik auf die Energiewende	194
5.3.5	Abstimmung der internationalen Wirtschafts- und Handelspolitik mit den Zielen einer nachhaltigen Energiepolitik	195
5.3.5.1	Abschluss eines Multilateralen Energiesubventionsabkommens (MESA)	195
5.3.5.2	Transformationsmaßnahmen im Rahmen von GATT/WTO	197
5.3.5.3	Präferenzielle Abkommen im Energiesektor	199
5.3.5.4	Technologietransfer und das TRIPS-Abkommen	199
5.3.5.5	Liberalisierung des Weltmarkts für Energiegüter?	200
5.3.5.6	Rechte und Pflichten für Direktinvestoren	203
5.3.6	Ausstieg aus der Kernenergie	204
5.3.7	Entwicklungszusammenarbeit: Energiewende durch globale Strukturpolitik gestalten	205
5.3.8	Initiierung von Modellprojekten mit weltweiter Signalwirkung	206
<b>6</b>	<b>Forschung für die Energiewende</b>	<b>209</b>
6.1	Systemanalyse	209
6.2	Gesellschaftswissenschaftliche Forschung	211
6.3	Technologieforschung und -entwicklung	214
6.3.1	Technologien zur Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen	214
6.3.2	Systemtechnologien einer nachhaltigen Energieversorgung	217
6.3.3	Entwicklung von Verfahren zur effizienteren Energienutzung	218
<b>7</b>	<b>Stationen des WBGU-Transformationsfahrplans: politische Zielgrößen, Zeitpläne und Maßnahmen</b>	<b>221</b>
7.1	Von der Vision zur Umsetzung: Chancen der nächsten 10–20 Jahre nutzen	221
7.2	Natürliche Lebensgrundlagen schützen	221
7.2.1	Emission von Treibhausgasen drastisch reduzieren	221
7.2.2	Energieproduktivität erhöhen	223
7.2.3	Erneuerbare Energien erheblich ausbauen	224
7.2.4	Aus der Kernkraft aussteigen	225

7.3	Energiearmut weltweit beseitigen	225
7.3.1	Globale Mindestversorgung anstreben	225
7.3.2	Internationale Zusammenarbeit auf nachhaltige Entwicklung ausrichten	226
7.3.3	Handlungsfähigkeit der Entwicklungsländer stärken	226
7.3.4	Regulatorische und privatwirtschaftliche Elemente kombinieren	227
7.4	Finanzmittel für die globale Energiewende mobilisieren	227
7.5	Modellprojekte als strategischen Hebel nutzen und Energiepartnerschaften eingehen	228
7.6	Forschung und Entwicklung vorantreiben	229
7.7	Institutionen globaler Energiepolitik bündeln und stärken	230
7.7.1	Koordinationsgremium gründen und Weltenergiecharta aushandeln	230
7.7.2	Politikberatung international verbessern	230
7.8	Fazit: Politische Gestaltungsaufgabe jetzt wahrnehmen	230
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>233</b>
<b>9</b>	<b>Glossar</b>	<b>247</b>
<b>10</b>	<b>Index</b>	<b>255</b>