

Inhaltsverzeichnis

1 Dekarbonisierung als strategischer Fixpunkt	1
1.1 Klimaschutz – die globale Herausforderung	2
1.1.1 Klimapolitische Initiativen im Überblick	3
1.1.2 Status quo – wo stehen wir am Beginn des dritten Jahrzehnts? . . .	7
1.2 Megatrends der globalen Energiewende	8
1.2.1 Dekarbonisierung.	9
1.2.2 Digitalisierung	11
1.2.3 Dezentralisierung.	12
1.3 Dekarbonisierung als strategischer Dreh- und Angelpunkt	13
1.4 Technologieoffen die Klimaziele erreichen	16
1.4.1 Etablierte Maßnahmen der Dekarbonisierung	16
1.4.2 Technologieoffenheit und prozessbezogene Maßnahmen der Dekarbonisierung.	17
2 Facetten der Dekarbonisierung	21
2.1 Treiber der Dekarbonisierung [WARUM]	22
2.1.1 Gesellschaftliche Erwartungen	22
2.1.1.1 Klimaschutz	23
2.1.1.2 Verantwortung.	25
2.1.1.3 Nachhaltige Urbanität.	26
2.1.2 Ökonomische Erwägungen	28
2.1.2.1 Energiebedarf	28
2.1.2.2 Energiekosten	29
2.1.2.3 Infrastruktur	31
2.1.3 Technische Rahmenbedingungen.	33
2.1.3.1 Energietechnik	34
2.1.3.2 Leistungsprozesse	36
2.1.4 Exogene Schocks – Beispiel Covid-19-Pandemie.	37

2.2	Handlungsfelder des Übergangs zur emissionsarmen Ökonomie [WO] . . .	39
2.2.1	Geschäftsstrategie	40
2.2.2	Betriebsprozesse	44
2.2.3	Governance und öffentliches Engagement.	46
2.3	Technologiefelder der Dekarbonisierung [WO]	48
2.3.1	Erneuerbare Energien und Energiemanagement	49
2.3.1.1	Drei Phasen der Dekarbonisierung eines Energiesystems	49
2.3.1.2	Übergang zwischen der Phase 2 auf Phase 3	51
2.3.2	Speicherlösungen	53
2.3.3	Sektorkopplung	56
2.4	Zielbild Dekarbonisierung [WOHIN]	59
2.4.1	Zielbilder stiften Orientierung für die Dekarbonisierung	59
2.4.2	Zielbild der technologieoffenen Dekarbonisierung	60
2.4.3	Abgeleitete Aktionsfelder technologieoffener Dekarbonisierung . . .	63
3	Handlungsoption Digitale Dekarbonisierung.	67
3.1	Energieflüsse als unterschätzter Hebel.	67
3.2	Sektorübergreifende Modellierung innovativer Technologieoptionen. . . .	69
3.2.1	Zielfunktion	69
3.2.2	Systemmodell Energiebedarfe	72
3.2.3	Systemmodell Energieumwandlungsanlagen	74
3.2.4	Systemmodell Energietransportinfrastruktur	77
3.2.5	Systemmodell Energieeinsparmaßnahmen	78
3.2.6	Systemmodell Strukturanpassungen der Industrie.	79
3.2.7	Systemmodell CO ₂ -negative Technologien	80
3.3	Idee der datenbasierten Dekarbonisierung.	81
3.3.1	Globale Geo-Datenbasis für Energiesysteme	81
3.3.1.1	Energiebedarf – Verbrauchsprofile und räumliche Verteilung	83
3.3.1.2	Installierte Erzeugungskapazitäten und Ausbaukorridore	86
3.3.1.3	Erzeugungsprofile aus erneuerbaren Ressourcen	87
3.3.2	Datenbasis zu Technologien und deren Entwicklungen	92
3.3.3	Regulatorische Randbedingungen und Szenariorahmen	92
3.3.4	Herausforderungen und Entwicklungspotenzial	94
3.3.4.1	Modellierungstiefe und Unsicherheiten in den Parametern	94
3.3.4.2	Automatisierte Datenerfassung und Datenaufbereitung . . .	95
4	Dekarbonisierung durch datenbasierte Optimierung.	97
4.1	Einführung in die Modellierungsmethodik	98
4.1.1	Festlegung des Betrachtungsobjekts	98

4.1.2	Anforderungen an die Optimierungsmethode	100
4.1.3	Lineare Optimierungsprobleme	101
4.1.4	Methode der Digitalen Dekarbonisierung	102
4.1.5	Zugrunde liegende Annahmen und Grenzen der Methode	109
4.1.6	Weiterführende Aspekte und Literaturverweise.	110
4.1.7	Umsetzung	111
4.1.8	Fokus: Modellierung von CO ₂ -Emissionen und prinzipielle Überlegungen zur Dekarbonisierung von Energiesystemen	111
4.2	Digitale Dekarbonisierung im Rahmen eines Analyse- und Beratungsprojekts	116
4.3	Von der Energiesystemdesign-Beratung zum optimierten Betrieb	118
5	Makrobetrachtung inklusive Anwendungsfälle	121
5.1	Entscheidende Aspekte der Makromodellierung	124
5.1.1	Klimaziele und Technologieneutralität	124
5.1.2	Migrationspfade und Betrachtungshorizont.	125
5.1.3	Versorgungssicherheit	126
5.2	Die Rolle der Sektorkopplung zur Erreichung der Klimaziele in Deutschland	127
5.2.1	Szenariorahmen und Sensitivitäten	128
5.2.2	Hebel zur kostenminimierten Dekarbonisierung	131
5.2.3	Ergebnisse Stromsektor	134
5.2.4	Ergebnisse Wärmesektor	137
5.2.5	Ergebnisse Verkehrssektor	138
5.2.6	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	139
5.3	Vergleich ausgewählter Länderenergiesysteme	142
5.3.1	Erneuerbare in vom Öl- und Gasexport dominierten Ländern im Mittleren Osten	142
5.3.1.1	Motivation und charakteristische Eigenschaften	143
5.3.1.2	Szenarien.	144
5.3.1.3	Ergebnisse.	147
5.3.2	Wie der Erneuerbaren-Ausbau die Energieflüsse umkehrt – das Beispiel Südafrika	150
5.3.2.1	Motivation regional aufgelöster Modellierung	150
5.3.2.2	Methodik zur Identifikation regionaler Cluster.	151
5.3.2.3	Fallstudie regionalisierte Dekarbonisierung am Beispiel Südafrika.	152
5.3.3	Die Erneuerbaren in Ländern mit mäßigem Erzeugungspotenzial – das Beispiel Malaysia.	154
5.3.3.1	Motivation und charakteristische Eigenschaften	154
5.3.3.2	Szenarien.	157
5.3.3.3	Ergebnisse.	158

5.3.4 Energiesystemarchetypen. 161

5.3.4.1 Motivation. 162

5.3.4.2 Methodik zur Identifikation der Archetypen. 162

5.3.4.3 Beschreibung der Energiesystemarchetypen
im Vergleich mit geografisch-wirtschaftlichen
Nachbarregionen. 164

5.3.4.4 Modellierung der Archetypen in einem
Energiesystemoptimierungsmodell. 167

5.3.4.5 Diskussion des Potenzials und der Grenzen von
Archetypen 168

6 Mikrobetrachtung inklusive Anwendungsfälle 169

6.1 Besonderheiten der Digitalen Dekarbonisierung bei
Mikrobetrachtungen. 170

6.2 Erste Anwendung der Methode zur Digitalen Dekarbonisierung auf
Mikroebene am Beispiel eines europäischen Flughafens 171

6.2.1 Einführung, Szenarien und Annahmen 171

6.2.2 Ergebnisse und Diskussion 175

6.3 Bedeutung von Regulatorik am Beispiel einer Molkerei. 178

6.3.1 Einführung, Annahmen und Szenarien 178

6.3.2 Ergebnisse und Diskussion 182

6.4 Wie die Dekarbonisierung der urbanen Wärmeversorgung gelingen
kann 185

6.4.1 Einführung in die urbane Wärmeversorgung in Deutschland 185

6.4.2 Technologien zur Dekarbonisierung der Fernwärme. 186

6.4.3 Standort in der technologieoffenen Betrachtung 188

6.4.4 Ergebnisse und Diskussion 190

6.5 Abschließende Bemerkungen zu den Mikrobetrachtungen. 193

7 Perspektive „weniger Treibhausgase“: eine Schlussbetrachtung. 195

Literatur. 201

Stichwortverzeichnis. 211