

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Energienutzung und Wachstum	1
1.2	CO_2 -Budget und Dekarbonisierung	4
1.3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	8
1.4	Struktur der Arbeit	8
2	Strahlungsbilanz und Treibhauseffekt	10
2.1	Strahlungsbilanz	10
2.1.1	Solar-Strahlung	10
2.1.2	Wärmehaushalt der Erde	12
2.2	Der natürliche und anthropogene Treibhauseffekt	13
2.2.1	Temperatur ohne Treibhausgase	13
2.2.2	Vereinfachte Abschätzung	15
3	Klimaverhalten	16
3.1	Klimaszenarien und Trends	16
3.1.1	Klimasensitivität	16
3.1.2	Projektionen und Szenarien	19
3.2	Der Klimawandel	20
3.2.1	Erwärmung der Atmosphäre	20
3.2.2	Extremwetterereignisse	23
3.2.3	Anstieg der Aussterberate aufgrund der Klimaerwärmung	25
4	Umweltbilanz und Energiewende	27
4.1	Umweltbilanz für den Strommix und Photovoltaik	27
4.1.1	Rückgang über die Jahre	27
4.1.2	Einzelbetrachtung für das Jahr 2017	28
4.1.3	Photovoltaisch erzeugter Strom	29
4.2	Die Energiewende	31
4.2.1	Anfänge der Energiewende	31
4.2.2	Das Energie-Einspeise-Gesetz EEG	32
4.2.3	Stromautobahnen	36
4.2.4	Kohleausstieg	37
4.2.5	Aktuelle Strompreissituation	38
5	Photovoltaische Stromerzeugung	40
5.1	Systemtechnische Beschreibung	40
5.1.1	Solarmodul	40
5.1.2	Systemkomponenten einer Photovoltaikanlage	41
5.2	Erzielbarer Solarertrag	44
5.2.1	Regionale Potentiale	44

5.2.2	Entwicklung der Globalstrahlung	45
5.2.3	Leistungsverhältnis oder Performance Ratio	47
5.2.4	Optimale Ausrichtung und Flächennutzung	47
6	Speicherung mittels Akkumulator	54
6.1	Speicherung von elektrischer Energie	54
6.1.1	Sinn von Speichern	54
6.1.2	Speicher für die Energiewende	55
6.1.2.1	Zentrale Speicher für die Dekarbonisierung	55
6.1.2.2	Dezentrale Speicher	56
6.1.2.3	Erhöhung des Eigenverbrauchs	58
6.2	Kennzahlen von Akkumulatoren	58
6.2.1	Wirkungsgrad	58
6.2.2	Stromstärke	59
6.2.3	Zyklen	59
6.2.4	Alterung	59
6.3	Lithium-Titanat-Akkumulator	61
6.3.1	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	61
6.3.2	Lithium-Titanat-Spinell	63
6.3.3	Laden und Entladen	65
6.4	Abschließende Betrachtungen	67
6.4.1	Akkumulator-Simulationsparameter	67
6.4.2	Reichweite von Lithium und Weiterentwicklungen	68
7	Ermittlung des Jahreslastprofils	69
7.1	Erfassen und Abrechnung von Strommengen	69
7.1.1	Zentralistische Messkonzepte	69
7.1.2	Dezentrales Messkonzept	73
7.2	Synthetische und gemessene Lastprofile	73
7.2.1	Synthetische Lastprofile	73
7.2.2	Gemessenes Siedlungslastprofil	76
8	Energie-Einsparpotentiale	78
8.1	Baubeschreibung des Projekts	78
8.1.1	Architektur	78
8.1.2	Solarthermie/Nahwärme und Fernwärme	81
8.1.3	Die Photovoltaikanlage	82
8.2	Konzepte zur Energieeinsparung	83
8.2.1	Smart Home- und Energiemanagement-System	84
8.2.2	Die elektrischen Verbraucher im Haushalt	85
8.2.2.1	Kühlschrank und Gefrierschrank	89
8.2.2.2	Waschmaschine	90
8.2.2.3	Wäschetrockner	90
8.2.2.4	Geschirrspülmaschine	91
8.2.3	Verbrauchsverlagerungen und Lastverschiebung	93
8.2.3.1	Klassische Lastverschiebung	93
8.2.3.2	Programmierte Verbrauchsverlagerungen	94
8.3	Der Faktor Mensch	97
8.3.1	Akzeptanz und bewusstes Handeln	97

8.3.2	Motivation und Framing	98
8.3.3	Eigennutz und Entscheidungsträgheit	99
9	Eigenstromversorgung	101
9.1	Grundlagen	101
9.1.1	Autarkiebestrebungen	101
9.1.2	Systemkomponenten	104
9.2	Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad	106
9.2.1	Eigenverbrauchsquote	106
9.2.2	Autarkiegrad	107
9.3	Optimierung von Autarkie und Eigenverbrauch	107
9.3.1	Einfluss von Generator- und Akkumulatorgröße	107
9.3.2	Energetische Optimierung des PV-Speicher-Systems	110
9.3.3	Maximal mögliche Autarkie	111
9.4	Optimierung von Autarkie und Eigenverbrauch	112
9.4.1	Momentanwerte	112
9.4.2	Wochenwerte	113
9.4.3	Jahreswerte für Eigenverbrauch und Autarkie	113
10	Betriebsstrategien zur Steigerung des Eigenverbrauchs	118
10.1	Technologische Betrachtung	118
10.1.1	Eigenverbrauch versus Smart Grid	118
10.1.2	Abregelungen und deren Auswirkungen	118
10.2	Datengrundlage für die Simulation	119
10.2.1	Verwendete Tools	119
10.2.2	Simulationsparameter	119
10.3	Betriebsstrategien ohne Vorhersage	122
10.3.1	Betriebsstrategie ohne Speicher, BS0	122
10.3.2	Betriebsstrategie zur Eigenbedarfsoptimierung, BS1	124
10.3.3	Linear verzögertes Laden, BS2	126
10.3.4	Vereinfachtes Peak Shaving, BS3	128
10.4	Ertragsprognosen und ihre Verwendung in Betriebsstrategien	130
10.4.1	Einstrahlungsvorhersagen und Lastprognosen	130
10.4.2	Prognosebasiertes Peak Shaving mittels PI-Regler	132
10.4.3	Prognosebasierte Ladestrategie des Angepassten Ausgleichs	135
10.4.3.1	Prinzipielle Vorgehensweise	135
10.4.3.2	Detailliertere Beschreibung der Funktionsweise	136
10.4.3.3	Charakteristische Effekte	137
10.4.3.4	Kennwerte für die Jahre 2016 und 2017	144
10.5	Vergleich der Betriebsstrategien	145
11	Umweltaspekte und Bewertung	147
11.1	CO ₂ -Verbrauch und Reduzierungspfade	147
11.2	Reduktionspotential durch Photovoltaik	149
11.2.1	CO ₂ -Fußabdruck	149
11.2.2	CO ₂ -Einsparung durch das Smart-Home-System	149
11.2.3	CO ₂ -Einsparung durch Autarkieerhöhung	150
11.3	Abschlussbetrachtung	151

A	Weitere Grundlagen des Klimasystems	153
A.1	Kohlenstoff	153
A.1.1	Kohlenstoff-Entstehung	153
A.1.2	Kohlenstoff- und Kohlendioxid-Eigenschaften	154
A.2	Sonnenentwicklung und Treibhauspotential	157
A.2.1	Entwicklung der Sonne und Goldilocks-Zone	157
A.2.2	Treibhauseffekt und -potential	158
A.3	Kohlenstoffkreislauf	161
A.3.1	Gleichgewichtslage	162
A.3.2	Der Carbonat-Silicat-Kreislauf	163
A.3.3	Der organische Kohlenstoff-Kreislauf	164
B	Klimageschichte	165
B.1	Ältere Klimageschichte	165
B.1.1	Entstehung der Atmosphäre	166
B.1.2	Klima im Paläozoikum und Mesozoikum	167
B.2	Neuere Klimageschichte	173
B.2.1	PETM und Känozoische Eiszeitalter	173
B.2.2	Entwicklung im Holozän	175
B.3	Weitere Auswirkungen des Klimawandels	176
B.3.1	Verschiebung der Vegetationszonen	176
B.3.2	Meeresversauerung	178
B.3.3	Erwärmung des Ozeans	179
B.3.4	Gletscherschmelze	179
B.3.5	Meeresspiegelanstieg	180
B.3.6	Vergleich der Erwärmungsphasen und Fazit	181
C	Umweltbilanz verschiedener Energieträger	183
C.1	Erneuerbare Energien	183
C.1.1	Windkraft	183
C.1.2	Biomasse	185
C.1.2.1	Ökobilanz von Biogas	186
C.1.2.2	Ökobilanz der Agrokraftstoffe	188
C.1.2.3	Ökobilanz von Holz	191
C.1.3	Wasserkraft	195
C.2	Endliche Energieträger	197
C.2.1	Kohle	201
C.2.2	Erdgas	202
C.2.3	Atomenergie	203
C.2.4	Fusionsenergie	203
D	Speicherthemen und Datenkorrektur	205
D.1	Akkumulatornutzung 2016/2017	205
D.2	Reichweite von Lithium und Weiterentwicklungen	206
D.2.1	Reichweite von Lithium	206
D.2.2	Weiterentwicklungen am Beispiel Magnesium	208
D.3	Datenkorrektur bzw. -wiederherstellung	210
D.3.1	Datengewinnung und Datenverlust	210
D.3.2	Datenrekonstruktion	211

E	Vertiefende Kapitel zur Photovoltaik	213
E.1	Physikalische Grundlagen	213
E.1.1	Eigenschaften des Photons	213
E.1.2	Der photovoltaische Effekt	215
E.2	Systemtechnische Beschreibung	216
E.2.1	Gleichungen und Kennlinien der Solarzelle	216
E.2.2	Kurzschluss-Strom und Leerauf-Spannung der Solarzelle	218
E.2.3	Leistungsparameter der Solarzelle	219
E.2.4	Solarmodul	220
E.2.5	Systemkomponenten einer Photovoltaikanlage	222
E.3	Solares Strahlungsangebot auf der Erdoberfläche	226
E.3.1	Einstrahlung auf die Horizontale	226
E.3.2	Einstrahlung auf geneigte Flächen	227
E.3.3	Globalstrahlung	228
E.4	Erzielbarer Solarertrag	229
E.4.1	Entwicklung der Globalstrahlung	229
E.4.2	Kennzahlen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit	230
E.4.3	Optimale Ausrichtung und Flächennutzung	230
F	Eine kurze Geschichte der Stromversorgung in Deutschland	232
F.1	Von den Anfängen bis in die 1950er Jahre	232
F.1.1	Das 19. Jahrhundert bis zum 1. Weltkrieg	232
F.1.2	Von der Novemberrevolution bis in die 50er Jahre	233
F.2	Das Atomzeitalter 1955 bis 2100	234
F.2.1	Anschubfinanzierung	234
F.2.2	Kommerzielle Nutzung	235
F.2.3	Atomausstieg und Kosten	236
F.3	Das Kohlezeitalter 1950 bis ca. 2038	237
F.3.1	Gezahlte Subventionen	237
F.3.2	Waldsterben und Emissionshandel	238
F.4	Zeit der Energiewende	239
F.4.1	Anfänge der Energiewende	239
F.4.2	Ausschreibungen und Windenergie-Erlass	240
	Literaturverzeichnis	243
	Abbildungsverzeichnis	284
	Tabellenverzeichnis	292