

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Übersicht über Energiespeichertechnologien	7
2.1 Elektrische Energiespeicher.....	8
2.2 Chemische Energiespeicher	11
2.3 Thermische Energiespeicher	13
3 Auswirkungen des zunehmenden Ausbaus erneuerbarer Energien im Stromsektor..	17
3.1 Charakteristik von Strom aus Wind und Sonne	17
3.2 Residuallast.....	20
3.3 Flexibilitätsbedarf im Stromsektor	21
3.3.1 Flexibilitätsoptionen	25
3.4 Bestehende Untersuchungen zu Stromspeicherpotentialen	27
4 Sektorenkopplung zur Flexibilisierung und Dekarbonisierung	31
4.1 Definitionen	31
4.2 Konzept der flexiblen Sektorenkopplung.....	33
4.3 Strom-Wärme-Kopplung	34
4.3.1 Ausgangslage im Wärmesektor	34
4.3.2 Kopplungstechnologien	36
4.4 Strom-Mobilität-Kopplung.....	39
4.4.1 Ausgangslage im Mobilitätssektor	39
4.4.2 Kopplungstechnologien	40

4.5	Bestehende Literatur zu Potentialen der Sektorenkopplung	42
5	Zielsetzung und methodisches Vorgehen.....	45
6	Modellierungsframework eSYS.pro	49
6.1	Modell vs. Modellierungsframework	49
6.2	Modellklassifikationen	50
6.3	Anforderungen an das für diese Arbeit zu entwickelnde Modell.....	51
6.4	Übersicht über eSYS.pro	53
7	Energiesystemmodell Deutschland – Modellbeschreibung	57
7.1	Kostenberechnung nach VDI 2067 Annuitätenmethode.....	59
7.2	Stromsektor	59
7.2.1	Strombedarf.....	59
7.2.2	Kraftwerke auf Basis konventioneller Energieträger.....	61
7.2.3	Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energien	65
7.2.4	Stromspeicher	66
7.2.5	Europäisches Verbundnetz	67
7.3	Wärmesektor	68
7.3.1	Wärmenetze	69
7.3.2	Dezentraler Wärmebedarf in Gebäuden.....	71
7.3.3	Industrieller Prozesswärmebedarf	73
7.3.4	Thermische Energiespeicher.....	74
7.4	Mobilitätssektor.....	75
7.4.1	Elektromobilität	76
7.4.2	Wasserstoffmobilität	77
7.4.3	Mobilität in Verbrennungskraftfahrzeugen.....	78
7.5	<i>Exkurs: Sensitivitäten hinsichtlich Modellierungsdetail und zeitlicher Granularität</i>	79
7.5.1	Modellierungsdetail des konventionellen Kraftwerksparks	81
7.5.2	Zeitliche Granularität	84

7.6	Validierung des Modells anhand historischer Daten des Jahres 2016	87
7.6.1	Eingangsdaten	87
7.6.2	Ergebnisse der Validierung	92
8	Szenarien zur flexiblen Sektorenkopplung	97
8.1	Konfigurationen	97
8.2	Technologieszenarien	99
8.2.1	Sektorenkopplung – „unflexibel“	99
8.2.2	Flexible Sektorenkopplung	101
8.2.3	Alternativen zur Sektorenkopplung	101
8.2.4	Kombinierte Ausbauoptimierung	101
8.3	Zugrundeliegendes Ausbauszenario	102
8.4	Leistungskennzahlen zur Evaluation der Ergebnisse	106
8.5	Eingangsdaten der Szenarien	106
8.5.1	Eingangsdaten der Basisszenarien	107
8.5.2	Technologieszenario 1 – P2H in Fernwärmenetzen	108
8.5.3	Technologieszenario 2 – Wärmepumpen in Fernwärmenetzen	108
8.5.4	Technologieszenario 3 – P2H in Gebäuden	109
8.5.5	Technologieszenario 4 – Wärmepumpen in Gebäuden	110
8.5.6	Technologieszenario 5 – P2H zur industriellen Prozesswärmebereitstellung 111	
8.5.7	Technologieszenario 6 – E-Mobilität	111
8.5.8	Technologieszenario 7 bis 12 - „Flexible“ Sektorenkopplung	112
8.5.9	Technologieszenario 13 – H ₂ -Mobilität	113
8.5.10	Technologieszenario 14 – Netz	114
8.5.11	Technologieszenario 15 – Stromspeicher	114
8.5.12	Technologieszenario 16 – Effizienzmaßnahmen im Wärmesektor	115
8.5.13	Technologieszenario 17 – kombinierte Ausbauoptimierung	116

9	Ergebnisse der Szenarioanalyse	117
9.1	Ergebnisse der Basisszenarien A0 B0.....	117
9.2	Ergebnisse der Szenarien 1-13 – Sektorkopplungstechnologien	121
9.2.1	Direktelektrische Wärmeerzeugung in Fernwärmenetzen A1/B1 A7/B7 ..	121
9.2.2	Wärmepumpen in Fernwärmenetzen A2/B2 A8/B8.....	125
9.2.3	Direktelektrische Wärmeerzeugung in Gebäuden A3/B3 A9/B9	129
9.2.4	Dezentrale Wärmepumpen für den Wärmebedarf in Gebäuden A4/B4 A10/B10	133
9.2.5	Direktelektrische Wärmeerzeugung für industrielle Prozesswärme A5/B5 A11/B11	138
9.2.6	Elektromobilität A6/B6 A12/B12	141
9.2.7	Wasserstoffmobilität A13 B13	143
9.3	Ergebnisse der Szenarien 14-16 – Alternative Ansätze	145
9.3.1	Ausbau der Netzkupplstellen B14	145
9.3.2	Ausbau Stromspeicher A15 B15	148
9.3.3	Effizienzmaßnahmen im Gebäudesektor A16 B16.....	150
9.4	Ergebnisse Szenario 17 – Kombinierte Ausbauoptimierung	152
9.5	Sensitivitätsanalysen	160
9.5.1	CO ₂ -Preis-Variation	160
9.5.2	Must-Run-Leistungen	163
9.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	165
9.6.1	Hauptergebnisse der Basisszenarien	165
9.6.2	Hauptergebnisse der Technologieszenarien	166
10	Zusammenfassung und Diskussion	173
	Literaturverzeichnis.....	181
	Anhang.....	195