

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Brennstoffzellen in Wohngebäuden – Grundlagen, Stand der Forschung und Technik	7
2.1	Was sind Brennstoffzellen?	7
2.1.1	Prinzip	7
2.1.2	Brennstoffe und Klimaschutz	8
2.1.3	Anwendungsmöglichkeiten in Wohngebäuden	9
2.2	Wohngebäude als ein potenzieller Markt	11
2.3	Stand der technischen Entwicklung und Erprobung von Brennstoffzellen für Wohngebäude	12
2.3.1	Umfeld und Status Quo	12
2.3.2	Technische Charakteristika	14
2.4	Stand der Anwendungsforschung	15
2.4.1	Betriebsstrategie, Betreibermodell	15
2.4.2	Systemanalysen, Markt- und Potenzialrechnungen, Netzauswirkungen	16
2.5	Forschungslücke	17
3	Möglichkeiten von Brennstoffzellen-KWK im zukünftigen Energiemarkt	19
3.1	Gesamtwirtschaftliche Sichtweise	19
3.1.1	Ökologische Strategie: Maximale Reduktion der Treibhausgas-Emissionen..	19
3.1.2	Ökonomische Strategie: Maximale Reduktion der Kosten der Energieinfrastruktur.....	19
3.2	Betriebs-/ einzelwirtschaftliche Sichtweise	22
3.2.1	Eigenerzeugung und Substitution von Strombezug	23
3.2.2	Direktverkauf im Objekt.....	24
3.2.3	Einspeisung in das Verteilnetz	24
3.2.4	Ausgleichsenergie.....	25
3.2.5	Regelenergie	26
3.2.6	Spotmarkt	27
3.2.7	Exkurs „Virtuelles Kraftwerk“	27
3.2.8	Verminderung der Höchstlast des elektrischen Netzes	28
3.2.9	Sonstige Erlösmöglichkeiten für kleine Brennstoffzellen-KWK-Anlagen	28
3.2.10	Erlösmöglichkeiten in der Übersicht	30
3.3	Resultat: implementierte Betriebsstrategien	34
4	Modellierung des zeitlichen Energiebedarfs von Referenzgebäuden .	36
4.1	Die Entwicklung des Wohngebäudesektors in Deutschland.....	36
4.1.1	Klassifizierung von Gebäuden und Haushalten.....	37
4.1.2	Bestimmung mittlerer, prototypischer Gebäude.....	41
4.2	Warum zeitlich detaillierte Modellierung?	46
4.3	Datenmodell Raumwärme	48

4.3.1	Einflussfaktoren des Raumwärmebedarfs	48
4.3.2	Datengrundlage und Berechnungsmethodik.....	49
4.3.3	Ergebnisse, Diskussion.....	50
4.4	Datenmodell Brauchwarmwasser	51
4.4.1	Einflussfaktoren des Brauchwarmwasserbedarfs	51
4.4.2	Datengrundlage.....	52
4.4.3	Methodik und Ergebnisse, Modellinput	53
4.5	Datenmodell Elektrizitätsbedarf	55
4.5.1	Einflussfaktoren des Elektrizitätsbedarfs	55
4.5.2	Datengrundlage.....	56
4.5.3	Methodik und Ergebnisse	58
5	Modellierung und Simulation des Anlageneinsatzes von Brennstoffzellen in Wohngebäuden	62
5.1	Modellinput.....	62
5.2	Methodik und Implementierung	64
6	Auslegung, Wirtschaftlichkeit und ökonomische Zielwerte von Brennstoffzellen in zukünftigen Wohngebäuden	69
6.1	Annahmen.....	70
6.1.1	Preise	70
6.1.2	Kostenfunktion der Investition und Wartung	73
6.2	Klassische Fahrweisen im Vergleich	74
6.2.1	Verlauf der simulierten Energienachfrage und -erzeugung.....	75
6.2.2	Energiebilanzen und technische Größen	77
6.2.3	Wirtschaftlichkeit und Anlagenauslegung.....	80
6.2.4	Fazit zu Anlagenauslegung und Betriebsweise	83
6.3	Verschiedene Wohngebäudestandards und -größen im Vergleich	84
6.3.1	Simulierter Anlageneinsatz	85
6.3.2	Energiebilanzen und technische Größen	85
6.3.3	Wirtschaftlichkeit und Anlagenauslegung.....	87
6.4	Wirtschaftlichkeit und Anlagenauslegung bei Anlagenbetrieb in Contracting-Modellen	88
6.5	Bonusstrategien: Bereitstellung von Reserveleistung, Vorgabe eines Stromprofils..	91
6.5.1	Verlauf der simulierten Energienachfrage und -erzeugung.....	92
6.5.2	Wirtschaftlichkeit und Anlagenauslegung.....	95
6.6	Sensitivitätsbetrachtungen	99
6.6.1	Wärmecontracting im Mehrfamilienhaus.....	99
6.6.2	Privatwirtschaftlicher, eigennutzender Betrieb	101
6.7	Fazit Auslegung und Wirtschaftlichkeit	104
7	Ökologische Zielwerte für Brennstoffzellen	112
7.1	Methodik der Zielwertbestimmung	112
7.2	Ergebnisse.....	115
7.2.1	Annahmen: Emissionsfaktoren, Wirkungsgrade	115

7.2.2	Ergebnisse.....	117
7.2.3	Fazit.....	120
8	Zukunftspotenzial und Auswirkungen im Energiesystem.....	122
8.1	Die Entwicklung des Energiesystems in Deutschland nach Energieszenarien.....	123
8.2	Die Langfristige Entwicklung des Wärmebedarfs in zwei Szenarien.....	124
8.2.1	Externe Annahmen und Treibergrößen.....	125
8.2.2	Wohngebäudemodell und Entwicklung Wärmebedarf.....	126
8.3	Entwicklung der Wärmeversorgung und resultierendes Brennstoffzellen-Potenzial.....	130
8.3.1	Wärmebereitstellung aus Szenarien.....	130
8.3.2	Potenzialgrenzen für Brennstoffzellen.....	133
8.3.3	Pfade der Erschließung des verbleibenden Potenzials durch Brennstoffzellen.....	136
8.3.4	Abschätzung der Marktgröße.....	140
8.3.5	Der Markt für Brennstoffzellenanlagen bis 2050 aus der verbleibenden Wärmenachfrage.....	141
8.3.6	Wärme- und Stromerzeugung aus Brennstoffzellen.....	145
8.4	Die Jahresganglinie des Wärme- und Strombedarfs in Deutschland.....	149
8.4.1	Die Jahresganglinien der Referenzgebäude.....	149
8.4.2	Ermittlung der Gesamtganglinie Wärme.....	150
8.4.3	Ermittlung der Gesamtganglinie Strom.....	151
8.4.4	Wärme- und Stromdauerlinie im Vergleich.....	152
8.5	Auswirkungen der Brennstoffzellen-Stromerzeugung im Energiesystem.....	153
8.5.1	Wärmegeführte Betriebsstrategie.....	154
8.5.2	Spitzenlastreduzierende Strategie (<i>Peak-Shaving</i>).....	158
8.5.3	Substitutionseffekte der Erzeugung aus Brennstoffzellen.....	160
8.6	Fazit Auswirkungen im Energiesystem.....	170
9	Zusammenfassung.....	173
9.1	Ausgangslage und Zielsetzung.....	173
9.2	Methodik und methodisches Ergebnis.....	174
9.3	Fachliches Ergebnis.....	176
9.4	Ausblick.....	179
	Literaturverzeichnis.....	181
	Anhang.....	188