

WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM

Die deutsche Energiewende im Kontext
gesellschaftlicher Verhaltensweisen

Anhang zur Studie

**Philip Sterchele, Julian Brandes, Judith Heilig, Daniel Wrede,
Christoph Kost, Thomas Schlegl, Andreas Bett, Hans-Martin Henning**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

1 Anhang

Link zur Studie: www.ise.fraunhofer.de/klimaneutrales-energiesystem.pdf
 Schaubilder der Studie und weitere Daten finden sich auch auf www.energy-charts.de.

1.1 Energiemengen der Hauptszenarien

Tabelle 1 – Stromverwendung in TWh

		Basislast	Verkehr	Industrie	Wärme- pumpe	Power- to-Heat	Power-to- Wasserstoff	Power-to- Methan	Power-to- Liquid	Sonstige
2030	Referenz	398	38	85	55	22	5	4	5	71
	Beharrung	398	28	140	48	0	11	7	12	76
	Inakzeptanz	398	42	77	45	24	3	4	6	57
	Suffizienz	338	24	78	33	8	5	2	2	56
	Referenz100	398	38	114	59	23	9	2	5	73
	Suffizienz2035	338	28	128	83	46	13	8	21	96
2040	Referenz	398	95	143	143	51	35	11	30	128
	Beharrung	398	68	201	90	0	98	102	37	137
	Inakzeptanz	398	95	111	127	61	25	14	25	116
	Suffizienz	278	71	123	123	26	16	7	18	87
	Referenz100	398	95	161	159	45	99	13	24	123
	Suffizienz2035	278	57	168	180	55	163	46	48	135
2050	Referenz	398	122	197	198	78	181	60	45	168
	Beharrung	398	86	243	96	0	198	200	59	184
	Inakzeptanz	398	100	189	155	95	121	33	48	144
	Suffizienz	218	88	188	171	55	118	47	49	134
	Referenz100	398	128	198	181	87	240	67	55	188
	Suffizienz2035	218	53	202	174	55	167	105	60	145

Tabelle 2 - Energienachfrage nach Sektoren in TWh

		Strom	Wärme	Verkehr	Industrie	Gesamt
2030	Referenz	398	774	695	487	2353
	Beharrung	398	773	722	480	2371
	Inakzeptanz	398	767	685	499	2349
	Suffizienz	338	811	580	482	2211
	Referenz100	398	769	692	476	2334
	Suffizienz2035	338	795	443	436	2012
2040	Referenz	398	683	549	445	2074
	Beharrung	398	814	639	422	2273
	Inakzeptanz	398	672	539	448	2057
	Suffizienz	278	705	412	418	1813
	Referenz100	398	676	509	412	1995
	Suffizienz2035	278	660	290	378	1606
2050	Referenz	398	632	474	395	1899
	Beharrung	398	805	635	379	2216
	Inakzeptanz	398	704	476	392	1970
	Suffizienz	218	609	324	372	1523
	Referenz100	398	704	476	392	1970
	Suffizienz2035	218	609	324	372	1523

Tabelle 3 – Energieverbrauch Verkehr (inkl. Luft- & inländische Schifffahrt) in TWh

		Wasserstoff	Methan	Flüssige	Strom
2030	Referenz	5	1	650	38
	Beharrung	6	2	686	28
	Inakzeptanz	2	4	638	42
	Suffizienz	4	2	550	24
	Referenz100	8	4	642	38
	Suffizienz2035	29	2	384	28
2040	Referenz	28	2	425	95
	Beharrung	35	1	535	68
	Inakzeptanz	45	3	396	95
	Suffizienz	14	2	326	71
	Referenz100	101	2	311	95
	Suffizienz2035	107	2	124	57
2050	Referenz	135	0	217	122
	Beharrung	44	0	505	86
	Inakzeptanz	174	0	202	100
	Suffizienz	77	0	159	88
	Referenz100	174	0	147	128
	Suffizienz2035	105	0	109	53

Tabelle 4 – Energieverwendung in der Industrie in TWh

		Kohle	Flüssige	Methan	Strom	Biomasse	Wasserstoff	Umweltwärme
2030	Referenz	87	8	250	72	58	8	4
	Beharrung	87	8	169	136	57	18	4
	Inakzeptanz	87	8	299	34	59	8	4
	Suffizienz	87	8	295	38	44	8	3
	Referenz100	64	8	215	106	58	20	4
	Suffizienz2035	15	8	125	121	66	97	5
2040	Referenz	56	0	137	145	85	14	8
	Beharrung	56	0	39	234	46	35	12
	Inakzeptanz	56	0	199	99	70	15	8
	Suffizienz	56	0	180	117	45	14	6
	Referenz100	17	0	85	185	60	57	9
	Suffizienz2035	0	0	0	196	54	117	10
2050	Referenz	35	0	6	228	33	80	13
	Beharrung	35	0	2	279	3	42	18
	Inakzeptanz	35	0	35	222	28	58	12
	Suffizienz	36	0	24	213	41	47	10
	Referenz100	0	0	1	227	33	106	13
	Suffizienz2035	0	0	12	236	12	69	13

Tabelle 5 – Verbrauch aufgeteilt nach Energieträgern im Sektor Raumwärme in TWh

		Flüssige	Fernwärme	Methan	Strom	Biomasse	Wasserstoff	Umweltwärme
2030	Referenz	88	141	386	46	41	0	71
	Beharrung	88	108	424	27	59	0	66
	Inakzeptanz	88	146	371	44	46	0	73
	Suffizienz	93	147	454	22	46	0	49
	Referenz100	87	147	355	55	42	0	83
	Suffizienz2035	82	97	265	93	41	96	120
2040	Referenz	1	188	187	115	17	13	162
	Beharrung	0	98	359	45	49	161	102
	Inakzeptanz	0	194	174	98	21	33	153
	Suffizienz	0	211	261	79	23	3	127
	Referenz100	0	168	148	124	17	38	180
	Suffizienz2035	0	110	72	154	16	86	221
2050	Referenz	4	192	31	148	1	49	207
	Beharrung	0	116	288	45	30	204	122
	Inakzeptanz	0	207	27	115	1	204	151
	Suffizienz	1	218	51	117	3	40	179
	Referenz100	1	189	24	136	1	58	200
	Suffizienz2035	3	173	33	116	1	18	199

H₂-Rückverstromung (Gasturbine)	Investition	€/kW _{el}	500	451	419	399	389	386	385
	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	Wirkungsgrad	%	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

Tabelle 7 - Energiewandler & Speicher

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wärmenetze	Investition	€/kW _{th}	400	400	400	400	400	400	400
	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Gasnetz	Investition	€/kW _{Gas}	28	28	28	28	28	28	28
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Anbindung - Offshore Seekabel	Investition	€/kW _{Wind_off}	430	430	430	430	430	430	430
	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
HGÜ (Nord-Süd-Anbindung)	Investition	€/kW _{Wind_off}	200	200	200	200	200	200	200
	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mittelspannung (Onshore Ausbau)	Investition	€/kW _{Wind_on}	180	180	180	180	180	180	180
	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Verteilnetz (PV-Ausbau)	Investition	€/kW _{PV}	140	140	140	140	140	140	140
	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Elektrolyse (MIX PEM/AEL/HTEL)	Investition	€/kW _{el}	738	676	613	584	554	525	495
	Lebensdauer	a	26	26	25	26	28	29	30
	M/O-Kosten	% Invest	3.5	3.4	3.3	3.5	3.6	3.8	3.9
	Wirkungsgrad	%	64.5	64.8	65.1	66.4	67.6	68.9	70.2
Stationäre Batterien	Investition	€/kW _{el}	400	275	150	138	125	113	100
	Lebensdauer	a	10	10	15	15	15	15	15
	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Wirkungsgrad	%	85.8	86.5	87.2	87.8	88.5	89.2	90.0
Wasserstoffspeicher & -verdichter	Investition	€/kW _{H₂}	163	163	163	163	163	163	163
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	Wirkungsgrad	%	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
Methanisierung	Investition	€/kW _{el}	1914	1494	1074	1040	1006	1000	995

Tabelle 9 - Heizungstechnologien - Einzelgebäude

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ölkessel	Investition	€/kW _{th}	136	136	136	136	136	136	136
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	Wirkungsgrad NT	%	94.0	94.0	94.0	94.0	94.0	94.0	94.0
	Wirkungsgrad HT	%	89.0	89.0	89.0	89.0	89.0	89.0	89.0
Gaskessel	Investition	€/kW _{th}	97	97	97	97	97	97	97
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	Wirkungsgrad NT	%	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0
	Wirkungsgrad HT	%	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0
Biomassekessel/Holzessel	Investition	€/kW _{th}	251	243	236	228	221	214	206
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	Wirkungsgrad NT	%	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0
	Wirkungsgrad HT	%	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
Gaswärmepumpe HT/NT	Investition	€/kW _{th}	1100	1100	1100	1000	1000	900	900
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0
Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Erdreich) NT	Investition	€/kW _{th}	1656	1574	1493	1409	1325	1244	1162
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Außenluft) NT	Investition	€/kW _{th}	900	857	815	770	725	683	640
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Hybride Wärmepumpe (el. WP und Gaskessel, Außenluft) NT	Investition	€/kW _{th}	997	954	912	867	822	780	737
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
BHKW Einzelgebäude <100 kW_{el} NT/HT	Investition	€/kW _{el}	1614	1534	1480	1448	1431	1425	1424
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Wirkungsgrad el.	%	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
	Wirkungsgrad th.	%	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0
H₂-Brennstoffzelle für Strom&Wärme im Einzelgebäude <100 kW_{el} NT	Investition	€/kW _{el}	8285	3903	2072	1455	1308	1289	1289
	Lebensdauer	a	15	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	3.6	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	Wirkungsgrad el.	%	62.9	63.4	63.9	64.4	64.9	65.4	65.9
	Wirkungsgrad th.	%	27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.1

Tabelle 10 - Biomasse-Wandler

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Holz- und holzartige Biomasse zu CH₄ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Investition	€/kW _{th}	2561	2198	1955	1808	1732	1704	1700
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Wirkungsgrad	%	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
Holz- und holzartige Biomasse zu H₂ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Investition	€/kW _{th}	1874	1609	1431	1323	1267	1247	1244
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Wirkungsgrad	%	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0
Holz- und holzartige Biomasse zu flüssigen Kraftstoffen (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Investition	€/kW _{th}	2835	2434	2164	2001	1917	1886	1882
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Wirkungsgrad	%	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0
Biodieselanlage (Raps zu Biodiesel)	Investition	€/kW _{th}	150	150	150	150	150	150	150
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Wirkungsgrad (Feld zu Fuel)	%	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
Biogasanlage (Rohstoff Biogas - ohne BHKW)*	Investition	€/kW _{Biogas}	965	852	776	731	707	698	697
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Biogas Aufbereitung (CO₂-Abscheidung -> Bio-Erdgas)	Investition	€/kW _{Gas}	538.5	412.7	328.4	277.3	251.1	241.4	240.0
	Lebensdauer	a	25	25	25	25	25	25	25
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Wirkungsgrad	%	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
BHKW < 0.5 MW (Biogas-Direktverstromung)	Investition	€/kW _{el}	556	541	528	517	509	503	500
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	Wirkungsgrad	%	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0

* Die verf. Energiemengen werden i.d.R. bereits als "Biogas" ausgewiesen, deshalb kein Wirkungsgrad.

Anhang

PKW Batterie- Elektromotor	Investition	€/PKW	33000	28812	24624	24358	24092	23827	23561
	Lebensdauer	a	15	15	15	15	15	15	15
	M/O-Kosten	% Invest	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Wirkungsgrad*	%	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0
	Anteil Batterie Fahrleistung	-	100	100	100	100	100	100	100
	Batteriekapazität	kWh	50	66.65	66.65	66.65	66.65	66.65	66.65
	Wirkungsgrad Batterie*	%	74.1	74.1	74.1	74.1	74.1	74.1	74.1

*Wirkungsgrad: Umrechnung von verwendetem Energieträger in Bewegungsenergie des Fahrzeuges

LKW Batterie-Elektromotor	Investition	€/LKW	204067	165765	136400	134700	133000	131200	129400
	Lebensdauer	a	15	15	15	15	15	15	15
	M/O-Kosten	% Invest	14.0	14.0	15.0	16.0	16.0	16.0	16.0
	Wirkungsgrad*	%	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0
	Anteil Batterie Fahrleistung	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Batteriekapazität	kWh	200	200	200	200	200	200	200
	Wirkungsgrad Batterie*	%	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0

*Wirkungsgrad: Umrechnung von verwendetem Energieträger zu Bewegungsenergie des Fahrzeuges.

Tabelle 13 – Ladeinfrastruktur PKW & LKW

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ladeinfrastruktur langsam (reine) Batteriefahrzeuge* PKW	Investition	€/Ladesäule	1283	1126	1005	1005	1005	1005	1005
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Ladeinfrastruktur schnell (reine) Batteriefahrzeuge* PKW	Investition	€/Ladesäule	629102	527507	448894	448894	448894	448894	448894
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Ladeinfrastruktur Brennstoffzellen Fahrzeuge * PKW	Investition	€/Ladesäule	2243051	2000991	1787894	1788360	1788360	1788360	1788360
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Ladeinfrastruktur CNG Fahrzeuge * PKW	Investition	€/Ladesäule	429350	429350	429350	429350	429350	429350	429350
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Ladeinfrastruktur langsam (reine) Batteriefahrzeuge* LKW	Investition	€/Ladesäule	0	93459	0	1451905	0	0	0
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Ladeinfrastruktur schnell (reine) Batteriefahrzeuge* LKW	Investition	€/Ladesäule	0	0	0	0	0	0	0
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Ladeinfrastruktur Brennstoffzellen Fahrzeuge * LKW	Investition	€/Ladesäule	2243051	2000991	1787894	1787894	1787894	1787894	1787894
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Ladeinfrastruktur CNG Fahrzeuge* LKW	Investition	€/Ladesäule	1708860	1584483	1469159	1469159	1469159	1469159	1469159
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

*Annahme Ladeinfrastruktur: keine Mehrkosten für hybride Konzepte

Tabelle 16 – Energiepreise in €/MWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Erdgas	23	23	23	23	23	23	23
Öl/Treibstoff	51	51	51	51	51	51	51
Steinkohle	13	13	13	13	13	13	13
Braunkohle	2	2	2	2	2	2	2
Strom aus AKW	30	30	30	30	30	30	30
Solare Prozesswärme	89	82	75	69	63	58	54
Biomasse (Holz/Stroh)	30	30	30	30	30	30	30
Biomasse Anbau	50	50	50	50	50	50	50
Biomasse (feucht)	1	1	1	1	1	1	1
H₂-Import	275	242	213	187	164	145	127
CH₄-Import	423	373	328	289	254	224	197
Fuel-Import	498	441	390	346	306	271	240