

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

kraftwerk	Lebensdauer	a	45	45	45	45	45	45	45
	M/O-Kosten	% Invest	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	Wirkungsgrad	%	41.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0
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 2 - 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 _{he}	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 (inkl. Elektrolyse und CO2-Abtrennung aus der Luft)	Investition	€/kW _{el}	1914	1494	1074	1040	1006	1000	995
	Lebensdauer	a	21	23	24	26	27	29	30
	M/O-Kosten	% Invest	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	Wirkungsgrad Elyse	%	57.1	59.3	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5
	Wirkungsgrad Sabatier	%	74.3	74.3	74.3	74.3	74.3	74.3	74.3
Erdgas-Dampf- Reformierung	Investition	€/kW _{Gas}	995	995	995	995	995	995	995
	Lebensdauer	a	15	15	15	15	15	15	15
	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	Wirkungsgrad	%	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4
Power-to-Methanol- to-Gasoline (inkl. CO2-Abtrennung aus der Luft)	Investition	€/kW _{el}	1814	1394	974	940	906	900	895
	Lebensdauer	a	21	23	24	26	27	29	30
	M/O-Kosten	% Invest	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	Wirkungsgrad	%	43.3	44.9	46.6	46.6	46.6	46.6	46.6

Tabelle 3 - Heizungstechnologien - Wärmenetze

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wärmenetze: Geothermie-Direktwärme (Tiefe>1000m, keine Stromerzeugung)	Investition	€/kW _{th}	3775	3584	3392	3221	3049	2895	2740
	Lebensdauer	a	30	30	35	35	40	40	50
	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Wärmenetze: GuD mit Wärmeauskopplung > 10 MW	Investition	€/kW _{el}	791	768	753	743	738	737	736
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Wirkungsgrad el.	%	56.0	58.0	59.0	60.0	61.0	62.0	63.0
	Wirkungsgrad th.	%	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Wärmenetze: (Groß-) Wärmepumpen (Wasser- Wasser)	Investition	€/kW _{th}	400	375	350	325	300	275	250
	Lebensdauer	a	25	25	25	25	25	25	25
	M/O-Kosten	% Invest	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Wärmenetze: Solarthermie (Freiflächenanlagen)	Investition	€/m ²	290	260	230	215	200	195	190
	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
	M/O-Kosten	% Invest	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Wärmenetze: Wärmespeicher (Wasser ca. 50 m³)	Investition	€/m ³	139	129	119	110	100	90	80
	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

Tabelle 4 - 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

CH₄-Brennstoffzelle NT	Investition	€/kW _{el}	9113	4293	2280	1600	1438	1418	1418
	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.	%	53.5	53.9	54.3	54.8	55.2	55.6	56.0
	Wirkungsgrad th.	%	33.0	33.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Erdreich) HT	Investition	€/kW _{th}	1822	1732	1642	1550	1458	1368	1278
	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) HT	Investition	€/kW _{th}	990	943	897	847	798	751	704
	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) HT	Investition	€/kW _{th}	1097	1049	1003	954	904	858	811
	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
H₂-Brennstoffzelle für Strom&Wärme im Einzelgebäude <100 kW_{el} HT	Investition	€/kW _{el}	8285	3903	2072	1455	1308	1289	1289
	Lebensdauer	a	10	10	10	10	10	10	10
	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Wirkungsgrad el.	%	55.1	56.9	58.7	60.5	62.3	64.1	65.9
	Wirkungsgrad th.	%	39.9	38.1	36.3	34.5	32.7	30.9	29.1
CH₄-Brennstoffzelle HT	Investition	€/kW _{el}	7826	3724	2071	1543	1429	1418	1418
	Lebensdauer	a	17	20	20	20	20	20	10
	M/O-Kosten	% Invest	3.5	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.0
	Wirkungsgrad el.	%	46.8	48.4	49.9	51.4	52.9	54.5	56.0
	Wirkungsgrad th.	%	39.0	38.2	37.3	36.5	35.7	34.8	34.0
Solarthermiekollektoren (Aufdachanlagen) NT/HT	Investition	€/m ²	550	475	400	375	350	330	310
	Lebensdauer	a	25	25	25	25	25	25	25
	M/O-Kosten	% Invest	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Wärmespeicher (Wasser) - in Einzelgebäuden	Investition	€/l	1	1	1	1	1	1	1
	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
	M/O-Kosten	% Invest	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Gebäudesanierung EnEV2015 -25% (Bezeichnung: "vollsaniert")	Investition	€/m ²	102	102	102	102	102	102	102
	Lebensdauer	a	50	50	50	50	50	50	50
	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Gebäudesanierung "Passivhaus" (Bezeichnung: "vollsaniert+")	Investition	€/m ²	180	180	180	180	180	180	180
	Lebensdauer	a	50	50	50	50	50	50	50
	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Absenkung der Vorlauftemperatur in Wohngebäuden (z.B. durch Fußbodenheizung)	Investition	€/m ²	60	60	60	60	60	60	60
	Lebensdauer	a	50	50	50	50	50	50	50
	M/O-Kosten	% Invest	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

Tabelle 5 - 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	€/kWh _{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 8 – 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 11 – 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