

Fortschreibung des Thüringer Klimagesetzes

Ergebnisse der Energiesystemmodellierung

Veranlassung

Die internationale Klima- und Energiepolitik hat in den vergangenen Jahren ihre Zielsetzungen noch einmal deutlich verschärft. Das hat sich auch in den energie- und klimapolitischen Zielen des Bundes niedergeschlagen: durch die Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetzes wurden die Zielvorgaben für die Treibhausgasminderung bis 2030 um 10 Prozentpunkte auf 65% angehoben und konkrete jährliche Zielvorgaben bis 2040 festgelegt [1]. Die anstehende Überarbeitung des Thüringer Klimagesetzes sollte sich an diesen Zielvorgaben orientieren.

Das vom Institut für Regenerative Energietechnik entwickelte Energiesystemmodell für Thüringen hat bisher die Restriktionen des bestehenden Thüringer Klimagesetzes [2] abgebildet [3]. Die folgenden Ergebnisse beruhen auf einer Modellrechnung, die auch für Thüringen ein Vorziehen der energie- und klimapolitischen Ziele abbildet.

Rahmenbedingungen

Die Berechnungen wurden für das **Zieljahr 2035** vorgenommen. Darin wurde von einer Übernahme der Reduktionsziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes von 77% für das Jahr 2035 im Vergleich zu 1990 ausgegangen [1]. Damit ergibt sich für 2035 eine **Emissionsobergrenze** von rund 7 Mio. t CO₂-Äquivalente. Ferner wurde ein schnellerer Ausbau der Erneuerbaren Energien antizipiert, der bereits 2035 und damit 5 Jahre vor dem im aktuellen Thüringer Klimagesetz genannten Jahr zu einer **bilanziell erneuerbaren** Deckung des Thüringer Endenergiebedarfs führt. Auch wurde entsprechend den Bundesvorgaben eine Ausweitung des Windkraftpotentials auf 2,2% der Landesfläche erlaubt. Daraus ergeben sich für das Energiesystemmodell die folgenden Restriktionen:

Gesamtemissionen 2035	≤ 7 Mio. t CO ₂ -Äquivalente
Erneuerbare Erzeugung 2035	= Endenergiebedarf 2035
Windkraftausbau	≤ 12.250 MW

Die **Energiebedarfe** Thüringens wurden [3] entnommen und linear aus den Werten für 2030 und 2040 interpoliert. Ferner wurden die **Eingangsparameter**, die weitgehend auf der dena-Leitstudie [4] beruhen, anhand der jüngeren Studien „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“ [5] [6] der Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme überprüft und ggf. angepasst (vgl. Datenanhang). Für die Energiepreise wurde aktuelle Werte von EnergyBrainpool herangezogen, die von einer deutlichen Beruhigung der Energiepreise in der zweiten Hälfte dieser Dekade ausgehen (Szenario 2035_1) [7]. Parallel wurde in einem zweiten Szenario 2035_X von einem Anhalten der Energiepreiskrise ausgegangen und bei bestimmten Energieträgern ein deutlich höherer Preis angesetzt. Die verwendeten Energiepreise sind in Tabelle

1 dargestellt. Für den Strompreis wurde wie bereits in [3] ein synthetischer Preis in Stundenauflösung ermittelt, der mit den Wind- und Einstrahlungsereignissen in Thüringen korreliert ist.

Tabelle 1: Energiepreise 2035 – die Quellen beziehen sich auf das Szenario 2035_1

Preis	Szenario 2035_1	Szenario 2035_X	Einheit	Quelle
Strom	73	110	€/MWh	[7], [8]
Erdgas	22	44	€/MWh	[7]
Mineralöl	26	39	€/MWh	[7]
Biomasse	25	50	€/MWh	[5]
Wasserstoff	213	213	€/MWh	[5]
Synthetische Kraftstoffe	390	390	€/MWh	[5]
Steinkohle	9	9	€/MWh	[7]
CO ₂ -Preis	120	120	€/t CO ₂ -Äq.	[8]

Ergebnisse

Die folgenden Berechnungsergebnisse wurden für eine Optimierung der Gesamtkosten unter Berücksichtigung der o.g. Restriktionen ermittelt. Die Abbildung 1 zeigt die Energiebilanz der beiden gerechneten Szenarien und belegt, dass eine bilanzielle Versorgung mit erneuerbaren Energien auch schon 2035 möglich ist. Sie zeigen aber auch, dass dafür ein schneller und entschlossener Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig ist. In Tabelle 2 sind die Leistungen aller Technologien aufgeführt.

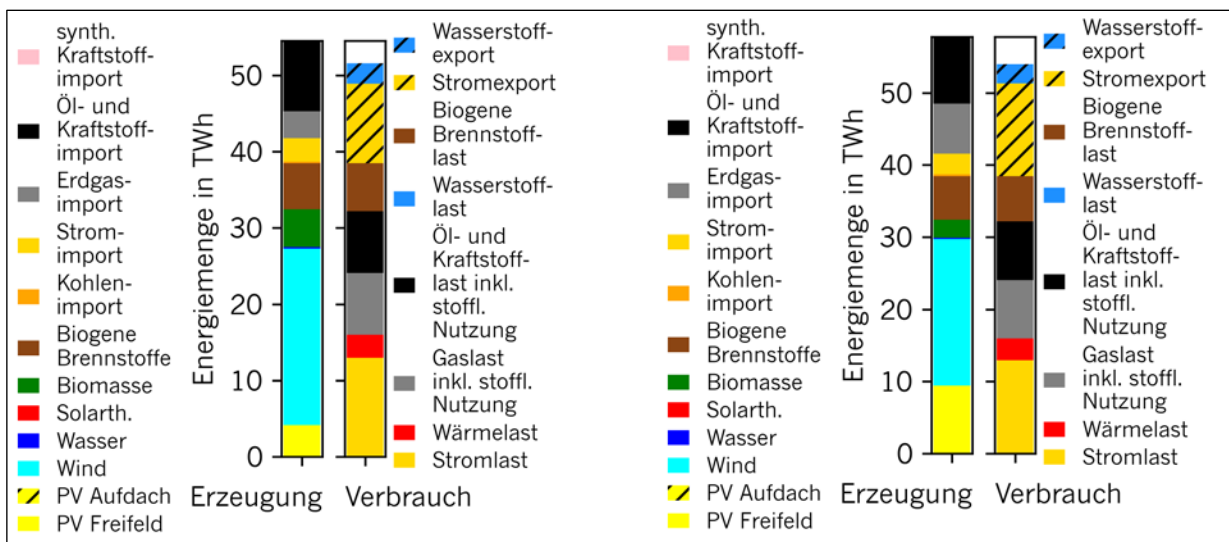


Abbildung 1: Energiebilanz 2035 für das Szenario 2035_1 (links) und 2035_X (rechts)

Zunächst zu den Ergebnissen für das **Szenario 2035_1**, das den prognostizierten Strompreisen aus [7] folgt: Die installierte **Windkraftleistung** muss sich im Vergleich zu heute (1.750 MW) mehr als verfünffachen. Dabei wird das vorausgesetzte Potenzial von 2,2% der Landesfläche allerdings nicht ausgeschöpft. Beim Ausbau der **Photovoltaik** ist mindestens von einer Verdoppelung auszugehen. Der bereits in [3] für nach 2040 beobachtete Trend, in Thüringen erzeugtes **Biogas** nicht zu verstromen, sondern Biomethan als Endenergieträger direkt in die Erdgasinfrastruktur einzuspeisen, wird bereits auf 2035 vorgezogen. Dem Ausbau

von PtH-Optionen gemeinsam mit einer saisonalen Speicherinfrastruktur kommt im Wärmebereich eine zentrale Bedeutung zu. Trotz größerer Elektrolysekapazitäten werden die Optionen Methanisierung und die Erzeugung Synthetischer Kraftstoffe nicht genutzt. Die impliziten Ausbauziele für Erneuerbare Energien, die hinter der Forderung „bilanziell erneuerbar“ stehen, sorgen für einen starken Rückgang der **Treibhausgasemissionen**: das zur Verfügung stehende Budget wird nur gut zur Hälfte ausgeschöpft. Die Kosten sind mit den heutigen vergleichbar.

Tabelle 2: Ergebnisse der Szenarien für 2035

Szenario	2035_1	2035_X
Leistungen in MW		
PV Dachanlagen	0	0
PV Freifieldanlagen	4.360	9.954
Windkraft	10.112	8.843
Solarthermie	0	0
Wasserkraft	31	31
Biomasse Verstromung	0	0
Biomasse Heizwerk	0	0
PtH Heizstab	3.368	3.838
Elektrolyse	826	1.291
Brennstoffzelle	0	0
Wasserstoffeinspeisung	0	0
Biomethananlage Bestand	286	286
Biomethananlage Neubau	278	0
GuD	72	292
PtG Methanisierung	0	0
PtH Wärmepumpe Fluss	101	101
PtH Wärmepumpe Abwärme	55	55
PtL Synthetische Kraftstoffe	0	0
Speicherkapazitäten in MWh		
Natriumspeicher	7.224	10.000
Wärmespeicher	174.281	159.360
Pumpspeicher	2.304	9.360
Erdgasspeicher	308.500	86.395
Wasserstoffspeicher	661.438	1.255.000
Emissionen in t CO₂-Äq.		
Gasemissionen	711.875	1.395.211
Ölemissionen	2.456.125	2.456.125
Stromemissionen	497.894	472.540
Steinkohleemissionen	80.656	80.656
Braunkohleemissionen	0	0
Gesamtemissionen	3.746.550	4.404.532
Kosten in Mio. €		
Annuität	1.895	2.279
OPEX	338	412
Im-/Export	262	12
Netz	38	54
Gesamtkosten	2.533	2.757

In **Szenario 2035_X** wurde von anhaltend hohen Energiepreisen ausgegangen (vgl. Tabelle 1). Auch hier muss sich die installierte Windkraftleistung im Vergleich zu heute etwa verfünffachen. Dabei wird das vorausgesetzte Potenzial von 2,2% der Landesfläche allerdings nicht ausgeschöpft. Beim Ausbau der **Photovoltaik** ist ebenfalls von einer Verfünffachung auszugehen. Durch die höheren Bezugskosten für Biomasse beschränkt sich die Erzeugung von **Biomethan** auf eine Umrüstung der Bestandsanlagen. Das fehlende Biomethan wird durch Erdgas ersetzt, sodass im Vergleich zu dem ersten Szenario knapp 20% höhere **Treibhausgasemissionen** anfallen. Trotz der in diesem Szenario angenommenen Steigerung der Energiebezugskosten zwischen 50 und 100% erhöhen sich die Gesamtkosten um weniger als 10%. Dies belegt, dass ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien ein ausgesprochen wirkungsvolles Werkzeug zur Dämpfung von Energiepreisen ist.

Anpassungen im Modell

Das Energiesystemmodell Thüringen wird durch das Institut für Regenerative Energietechnik im Rahmen des ZO.RRO-Projekts kontinuierlich weiterentwickelt. Gegenüber der in [3] veröffentlichten Modellbeschreibung wurden neben der Anpassung von Parameterwerten (vgl. Datenanhang) folgende Änderungen vorgenommen:

- Für den COP der Wärmepumpen wird nun kein fester Wert mehr herangezogen, sondern ein außentemperaturabhängiger Wert für jeden Zeitschritt ermittelt.
- Die Einbindung Thüringens in das Deutsche Übertragungsnetz für Elektrizität wurde mit einer Leistungsobergrenze von 5.000 MW gerechnet. Dieser Wert entspricht gut einem Drittel der derzeit physikalisch vorhandenen Kapazität. Die Kapazität von Ausbauprojekten wurden nicht berücksichtigt, zumal hier von einer hohen Grundauslastung für die Nord-Süd-Verbindung auszugehen ist.
- Bei Wärmespeichern werden Verluste nun nicht mehr als pauschale Verlustrate, sondern außentemperaturabhängig berechnet.

Literatur

- [1] Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. BGBl 2021 Teil I Nr. 59, Seite 3905-3907.
- [2] Thüringer Gesetz zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (Thüringer Klimagesetz)., GVBl. 2018, 816.
- [3] in.RET (Hg.), „So geht's - wie Thüringen klimaneutral wird,“ Nordhausen, 2021.
- [4] Deutsche Energieagentur (Hg.), „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende,“ Berlin, 2018.
- [5] Fraunhofer ISE (Hg.), „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen,“ Freiburg, 2020.
- [6] Fraunhofer ISE (Hg.), „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update Klimaneutralität 2045,“ Freiburg, 2021.

- [7] Energy BrainBlog (Hg.), „EU Energy Outlook 2050: Wie entwickelt sich der europäische Strommarkt in den nächsten 30 Jahren?“, 2022. [Online]. Available: <https://blog.energybrainpool.com>. [Zugriff am 10 10 2022].
- [8] e. Alexander Fernahl, „ENERGY BRAINREPORT 2021 - Prämissen und Berechnungsergebnisse für das 4.Quartal 2021,“ Berlin, 2021.
- [9] V. Wesselak, T. Schabbach und et.al., „Handbuch Regenerative Energietechnik, 3. Auflage,“ Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [10] J. Giesecke und S. M. E. Heimerl, „Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb, 6. Auflage,“ Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [11] V. Wesselak, „Meilensteinbericht Fallbeispiel Thüringen,“ Nordhausen, 2019.
- [12] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, „Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung,“ 2014. [Online]. Available: https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples//e/leitfaden_biogaseinspeisung-druck-web.pdf. [Zugriff am 10 03 2021].
- [13] A. Sterner und I. Stadler, „Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, 2. Auflage,“ Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [14] Fichtner, „Erstellung eines Entwicklungskonzeptes Energiespeicher in Niedersachsen,“ 07 2014. [Online]. Available: <https://docplayer.org/5174810-Erstellung-eines-entwicklungskonzeptes-energiespeicher-in-niedersachsen.html>. [Zugriff am 18 08 2021].
- [15] F. Klumpp und V. Wesselak, „Energiesystem Thüringen 2040,“ Erfurt, 2019.
- [16] ARGE Untergroßspeicher Thüringen, „Potenzialstudie Untergroßspeicher in Thüringen Systemkomponenten zur Verbesserung der Grundlastfähigkeit Erneuerbarer Energien,“ Jena, 2014.

Datenanhang

Tabelle 3: Parameter Photovoltaik Aufdachanlagen

Photovoltaik Aufdach	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	737	€/kW	[4]
OPEX	3,1	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	[4]

Tabelle 4: Parameter Photovoltaik Freifeldanlagen

Photovoltaik Freifeld	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	620,25	€/kW	[4]
OPEX	3,1	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	[4]

Tabelle 5: Parameter Windkraft

Windkraft	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	1.026	€/kW	[4]
OPEX	1,84	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	[4]

Tabelle 6: Parameter Solarthermie

Solarthermie	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	270	€/m ²	[9]
OPEX	1,5	% von CAPEX	[9]
Lebensdauer	25	a	[9] ↑

Tabelle 7: Parameter Wasserkraftanlagen (Laufwasser)

Wasserkraft	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	5.000	€/kW	[10]
OPEX	5	% von CAPEX	[10]
Lebensdauer	60	a	[10]

Tabelle 8: Parameter Biogas BHKW in KWK

Biogas	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	2.394	€/kW	[4]
OPEX	5,02	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	30	a	[4]
Wirkungsgrad el.	38	%	[9]
Wirkungsgrad th.	49	%	[9]

Tabelle 9: Parameter Biomasse Stromerzeugung

Biomasse el.	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	3.292	€/kW	[4]
OPEX	5	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	30	a	[4]
Wirkungsgrad el.	30	%	[4]

Tabelle 10: Parameter Biomasse Wärmeerzeugung

Biomasse th.	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	3.294	€/kW	[4]
OPEX	5,02	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	30	a	[4]
Wirkungsgrad th.	88	%	[11]

Tabelle 11: Parameter Biogaseinspeisung Bestandsanlagen

Biogaseinspeisung Bestandsanlagen	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	250	€/kW	eigene Berechnung
OPEX	5	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	Expertengespräch
Wirkungsgrad	90	%	Expertengespräch

Tabelle 12: Parameter Biogaseinspeisung Neuanlagen

Biogaseinspeisung Neuanlagen	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	2.150	€/kW	[12]
OPEX	5	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	Expertengespräch
Wirkungsgrad	90	%	Expertengespräch

Tabelle 13: Parameter Gas- und Dampfkraftwerk in KWK

GuD in KWK	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	743	€/kW	[5] ↓
OPEX	4,02	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	30	a	[4]
Wirkungsgrad el.	45	%	[4]
Wirkungsgrad th.	43	%	[4]

Tabelle 14: Parameter Fischer-Tropsch-Synthese (PtL)

Fischer-Tropsch-Synthese	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	465	€/kW	[4]
OPEX	9,7	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	[4]
Wirkungsgrad	66	%	[4]

Tabelle 15: Parameter Methanisierung

Methanisierung	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	220	€/kW	[4]
OPEX	2,3	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	25	a	eigene Berechnung
Wirkungsgrad	90	%	[4]

Tabelle 16: Parameter Elektrolyse

Elektrolyse	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	700	€/kW	[4]
OPEX	0,83	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	16	a	[4]
Wirkungsgrad	84	%	[4]

Tabelle 17: Parameter Brennstoffzelle

Brennstoffzelle	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	700	€/kW	[13]
OPEX	2	% von CAPEX	[13]
Lebensdauer	20	a	[13]
Wirkungsgrad	60	%	[13]

Tabelle 18: Parameter Luftwärmepumpe (großtechnisch), temperaturabh. COP

Luftwärmepumpe	2030	Einheit	Quelle
CAPEX	847	€/kW	[5]↓
OPEX	1	% von CAPEX	[5]↓
Lebensdauer	20	a	[5]=
COP (T _{VL} , T _A , Gg.)	Ø 2,044		eigene Berechnung↓
T _{VL}	90	°C	Expertengespräch
Gütegrad (Gg.)	0,45		Expertengespräch
T _A	Ø 9,4	°C (Zeitreihe)	eigene Berechnung

Tabelle 19: Parameter Elektrodenheizkessel (bzw. Heizstab)

Heizstab	2030	Einheit	Quelle
CAPEX	100	€/kW	[4]
OPEX	2	% von CAPEX	[4]
Lebensdauer	20	a	[4]
Wirkungsgrad	99	%	[4]

Tabelle 20: Parameter Erdwärmepumpe (großtechnisch), Temp.-abh. COP

Erdwärmepumpe	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	1.550	€/kW	[5]↑
OPEX	1	% von CAPEX	[5]↓
Lebensdauer	20	a	[5]=
COP (ϑ)	2,042		eigene Berechnung↓
T _{VL}	90	°C	Expertengespräch
Gütegrad	0,45		Expertengespräch
T _A	10	°C	Expertengespräch

Tabelle 21: Parameter Wasserstoffeinspeisung

Wasserstoffeinspeisung	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	35	€/kW	[14]
OPEX	1	% von CAPEX	[14]
Lebensdauer	20	a	[14]
Wirkungsgrad	95	%	[14]

Tabelle 22: Parameter Natriumspeicher

Natriumspeicher	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	552	€/kW	[5]↑
CAPEX	138.000	€/MWh	[5]↑
OPEX	0,3	% von CAPEX	[15]
Lebensdauer	15	a	[4]
Wirkungsgrad	90	%	[4]
Kehrwert C-Rate	4	MWh/MW	[15]

Tabelle 23: Parameter Pumpspeicherkraftwerk

Pumpspeicher	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	900	€/kW	[14]
CAPEX	112.500	€/MWh	[14]
OPEX	1	% von CAPEX	[14]
Lebensdauer	80	a	[14]
Wirkungsgrad	80	%	[14]
Kehrwert C-Rate	8	MWh/MW	[14]

Tabelle 24: Parameter Wärmespeicher mit temperaturabhängigen Verlusten

Wärmespeicher	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	7,5	€/kW	[13]
CAPEX	750	€/MWh	[13]
OPEX	0,3	% von CAPEX	[13]
Lebensdauer	20	a	[13]
Verlustrate	0,935	%/d	eigene Berechnung
fixed_losses_relative	Ø 0,00012	%/h	eigene Berechnung
fixed_losses_absolute	Ø 0,0783	MWh	eigene Berechnung
Kehrwert C-Rate	10	MWh/MW	[13]

Tabelle 25: Parameter (Erd-)Gasspeicher

Gasspeicher	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	15	€/kW	[16]
CAPEX	18,2	€/MWh	[16]
OPEX	5	% von CAPEX	[16]
Lebensdauer	20	a	[16]
Wirkungsgrad	95	%	[16]
Kehrwert C-Rate	800	MWh/MW	[16]

Tabelle 26: Wasserstoffspeicher

Wasserstoffspeicher	2035	Einheit	Quelle
CAPEX	68	€/kW	[16]
CAPEX	53	€/MWh	[16]
OPEX	5,5	% von CAPEX	[16]
Lebensdauer	20	a	[16]
Wirkungsgrad	60	%	[16]
Kehrwert C-Rate	1.277	MWh/MW	[16]