

## EINFLUSS DES WINDKRAFTANTEILS AM ENERGIEMIX AUF DIE VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN GESAMTKOSTEN DES ENERGIESYSTEMS – DAS BEISPIEL THÜRINGEN

Viktor Wesselak<sup>1</sup>, Theresa Reinhardt<sup>1</sup>, Christoph Schmidt<sup>1</sup>, Sebastian Voswinckel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Nordhausen, Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET)

Weinberghof 4, 99734 Nordhausen

### ABSTRACT

Im Zuge der politischen Diskussionen um die Transformation des Energiesystems hin zu Klimaneutralität wird die Rolle der Windkraft als wichtiger Beitrag zur Kostensenkung häufig unterschätzt. Im Rahmen dieses Beitrags werden die Auswirkungen eines zu geringen Windkraftanteils auf die volkswirtschaftlichen Kosten sowie den gesamten Technologiemix am Beispiel des Bundeslandes Thüringen untersucht. Dabei wird für das Jahr 2045 eine ausgeglichene Energiebilanz Thüringens angenommen. Im Ergebnis zeigt sich ein deutlicher Anstieg der volkswirtschaftlichen Gesamtkosten des Energiesystems mit sinkender Windkraftleistung. Bei einer zu starken Reglementierung des Windkraftausbaus kann die Energiebilanz Thüringens schließlich nicht mehr ausgeglichen werden.

---

### 1. AUFGABENSTELLUNG

Für das Bundesland Thüringen liegt ein sektorübergreifendes Energiesystemmodell [1,2] in Stundenauflösung vor (vgl. Anhang). Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich einen kostenoptimalen Technologiemix zu ermitteln. Dabei können Randbedingungen wie eine Begrenzung der Treibhausgasemissionen oder ein bilanzieller Ausgleich des Energieaustausches über die Landesgrenzen berücksichtigt werden.

Dem Modell liegt eine Energiepotential- sowie eine Energiebedarfsanalyse für Thüringen im Jahr 2045 zugrunde. Die Energiepotentiale beschränken die Möglichkeiten für den Ausbau bestimmter Technologien (Abschnitt 2); die Energiebedarfsanalyse definiert die Versorgungsaufgabe, die zu jedem Zeitschritt gelöst werden muss (Abschnitt 3).

In einem ersten Schritt wurde gemäß dem Windenergieflächenbedarfsgesetz das Windkraftpotential auf 2,2 Prozent der Landesfläche begrenzt [3]. Die Optimierungsrechnung erfolgte unter der Maßgabe der Klimaneutralität zunächst frei, d.h. ohne weitere Restriktionen. In einem zweiten Schritt wurde eine an den Energiebedarfen Thüringens orientierte Beschränkung des Ausbaus Erneuerbarer Energien eingeführt: die Summe aller Energieimporte wurde bilanziell gleich der Summe der Energieexporte gesetzt. Die sich dabei ergebende, optimale Windkraftleistung für Thüringen wurde schließlich schrittweise um jeweils 10 Prozentpunkte verringert und anschließend eine neue Optimierungsrechnung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser insgesamt 12 Optimierungsläufe werden in Abschnitt 5 vorgestellt und diskutiert. Einige Schlussfolgerungen schließen den Beitrag ab.

### 2. ENERGIEPOTENZIALE

Trotz nennenswerter Ressourcen im Bereich der Biomasse liegen die wesentlichen Energiepotenziale Thüringens im Bereich der Windkraft und Photovoltaik. Wasserkraft in Form von Laufwasserkraftwerken spielt nur eine untergeordnete Rolle, wohingegen bei Pumpspeicherwerkwerken noch neue Potenziale erschlossen werden könnten [4]. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten der im Rahmen dieser Studie herangezogenen Energiepotenziale Thüringens. Dabei wurde für die Windkraft ein Flächenpotenzial von 2,2

Prozent der Landesfläche angenommen. Bei der Photovoltaik wird zwischen dem Potenzial auf Dachflächen und Freiflächen unterschieden; die Methodik ist in [1] ausführlich beschrieben. Während die bisherigen Potenziale als installierbare Leistungen angegeben sind, aus denen sich dann ein Energieertrag errechnet, wird bei der Biomasse die verfügbare Energiemenge angegeben.

Tabelle 1: Technische Energiepotenziale ausgewählter Energieträger in Thüringen

Potential	Leistung in GW	Erzeugte Energie in GWh
Windkraft	10,69	24.596
Photovoltaik	23,08	21.631
davon Dachflächen	5,67	5.192
davon Freiflächen	17,41	16.539
Wasserkraft	0,03	180
Biomasse		10.440
davon feste Biomasse		6.558
davon Biomasse-Substrat		3.882

### 3. ENERGIEBEDARFE

Die im Rahmen dieser Untersuchung genutzten Endenergiebedarfe Thüringens basieren auf einer sektoralen Nutzenergieanalyse bis 2045. Dabei wurden die demographische Entwicklung, der Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen und Gebäudesanierungen sowie der wachsende Einsatz von Sektorkopplungstechnologien wie Power-to-Heat oder Power-to-Liquid berücksichtigt. Eine Veröffentlichung von Berechnungen und Methodik ist für Anfang 2026 vorgesehen [7].

Abbildung 1 (oben) zeigt die Entwicklung der Endenergiebedarfe der einzelnen Sektoren. Es ist zu erkennen, dass der Endenergieverbrauch bis 2045 um ein Drittel zurückgeht; die größten Effizienzpotentiale liegen mit der Einführung der Elektromobilität im Verkehrssektor sowie durch Gebäudesanierungen und den Einsatz von Wärmepumpen im Wohngebäudebereich. Bei einem annähernd gleichbleibenden Bedarf der Industrie wird diese zum dominierenden Faktor.

In Abbildung 1 (unten) ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern dargestellt. Wenig überraschend avanciert Strom zum wichtigsten Energieträger: sein Anteil am Endenergieverbrauch hat sich mehr als verdoppelt, absolut ergibt sich bis 2045 ein Zuwachs von 67 Prozent. Wasserstoff spielt für die Prozesswärmebereitstellung in der Industrie eine gewisse Rolle, kommt jedoch über einen Anteil von 3 Prozent am Gesamtverbrauch nicht hinaus. Da für 2045 Klimaneutralität vorausgesetzt wird, muss der verbleibende Bedarf an Brenngasen und Kraftstoffen durch biomassebasierte oder synthetische Energieträger gedeckt werden.

Neben den klassischen Energiesektoren wird zusätzlich im Energiesystemmodell Thüringen auch der wachsende Energiebedarf von Rechenzentren mit 3.600 GWh im Jahr 2045 berücksichtigt [5]. Ferner benötigt die Bereitstellung von Fernwärme und ggf. auch von Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen zusätzliche Elektrizität; in den beiden letzten Fällen entscheidet der Optimierer, ob ein Import oder eine dezentrale Erzeugung in Thüringen einen Kostenvorteil ergibt. Werden alle Elektrizitätsbedarfe zusammengefasst, ergibt sich für 2045 etwa eine Verdoppelung gegenüber dem Ist-Zustand.

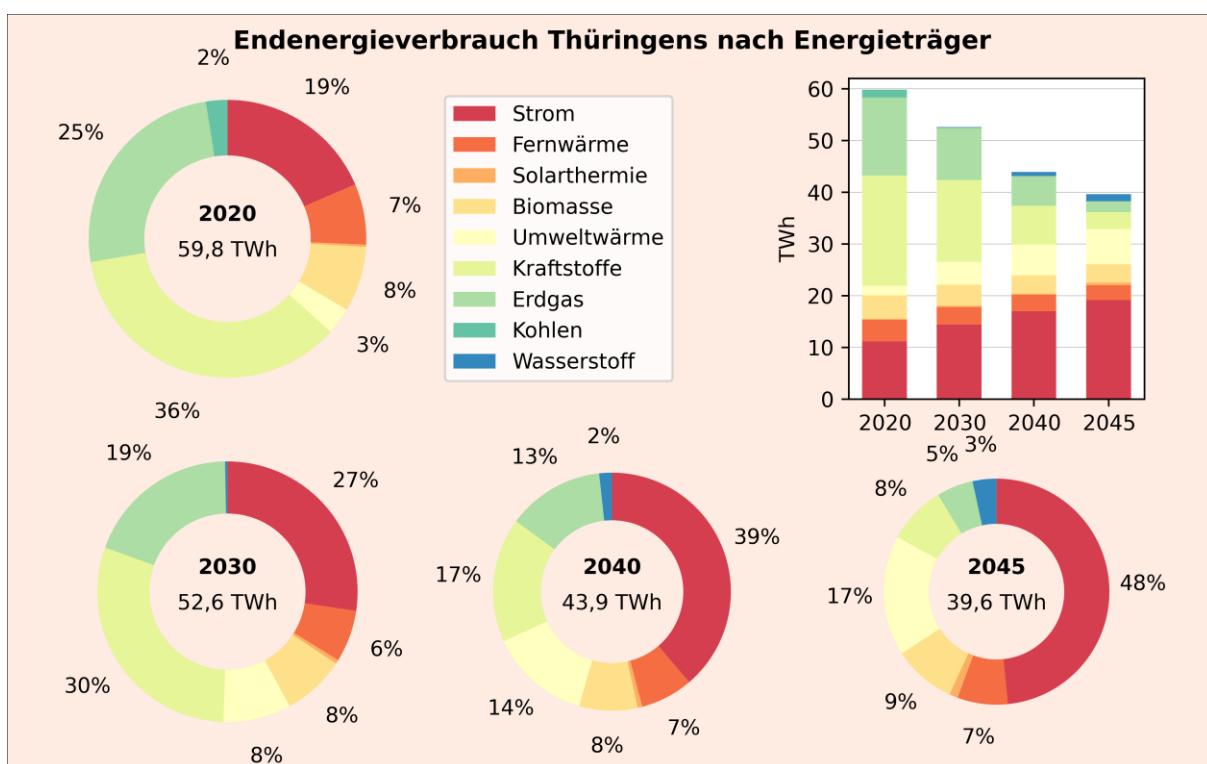
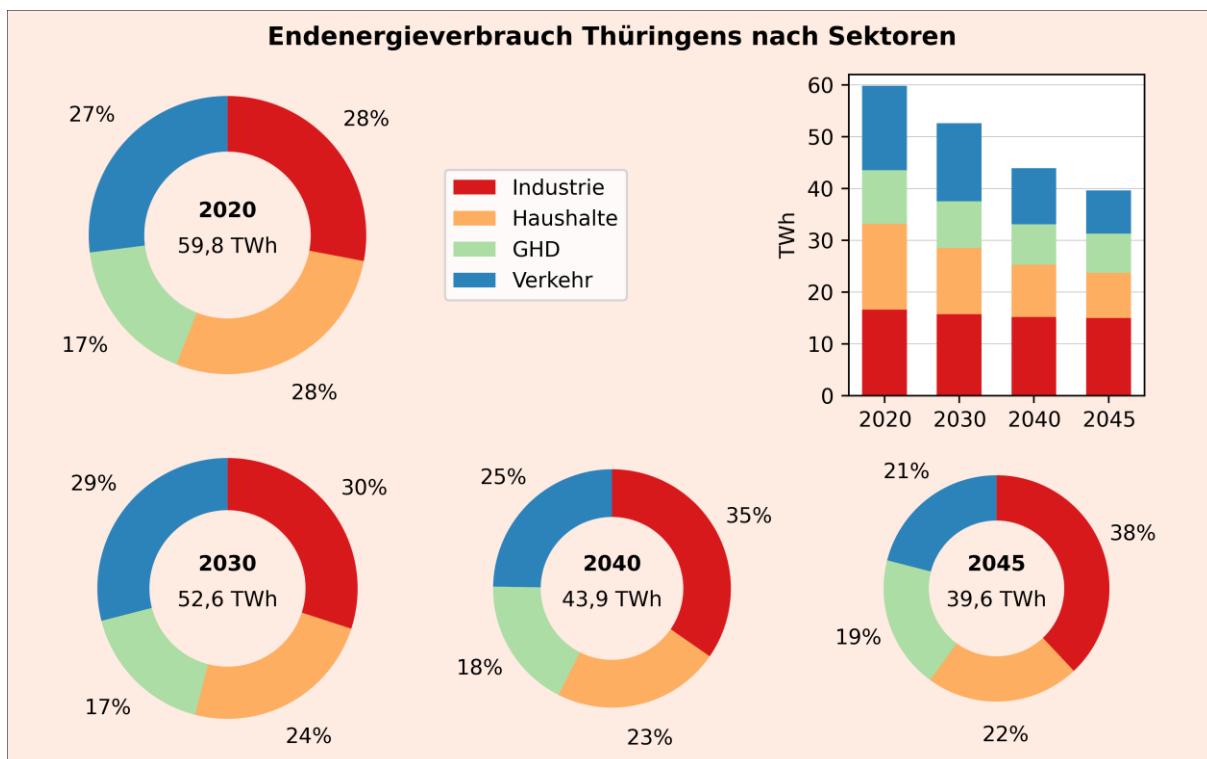


Abbildung 1: Endenergieverbrauch Thüringens nach Sektoren (oben) und Energieträgern (unten) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2045. Abweichungen zur Thüringer Energiebilanz 2020 resultieren aus dem Bezugsjahr 2019 für den Verkehrsbereich.

## 4. PREISE UND KOSTEN

Das Energiesystemmodell Thüringen greift sowohl hinsichtlich der technischen Parameter als auch der Kosten der implementierten Technologien auf verschiedene Studien zurück; diese werden in [7] ausführlich diskutiert. Tabelle 2 zeigt die für das Jahr 2045 zugrunde gelegten Kostenparameter für ausgewählte Technologien.

Tabelle 2: Parameter ausgewählter Energiewandler für 2045

Technologie	Capex in €/kW	Opex in % Capex	Lebensdauer in Jahren	Wirkungsgrad in %
Windkraft	1037	2,5	25	-
Photovoltaik Dachflächen	576	2,0	25	-
Photovoltaik Freiflächen	390	2,0	25	-
PtG Elektrolyseur	423	4,0	20	70
PtL Syntheseanlage	548	3,0	30	38,5
PtH Elektrodenheizkessel	80	2,0	20	99
PtH Luftwärmepumpe	756	1,0	20	$f(T_{amb})$

Das Energiesystemmodell Thüringen verarbeitet auch Preisinformationen über Energie- und Rohstoffpreise. Insbesondere dem Strommarkt kommt in Zukunft eine besondere Bedeutung zu, sodass hier eine stundenauflöste Preiszeitreihe verwendet wird. Für den Elektrizitätsaustausch mit dem europäischen Übertragungsnetz wurde auf Preiszeitreihen der Firma Energy Brainpool [6] zurückgegriffen. Zur Modellierung des europäischen Strommarktes auf Stundenbasis benutzt Energy Brainpool ein Merit-Order-Marktmodell auf Basis des prognostizierten europäischen Kraftwerksparks. Dazu sind Annahmen zu Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Kosten zu treffen, welche dem Announced Pledges Szenario des World Energy Outlook 2023 entnommen wurden. Das Energiesystemmodell Thüringen nutzt das Szenario Central. Abbildung 2 zeigt die Gang- und Dauerlinie des verwendeten Strompreises für 2045. Es zeigt sich, dass der Strompreis in wenigen Stunden des Jahres mit über 200 €/MWh sehr hoch ist. Aufgrund des hohen Anteils erneuerbarer Energien sinkt der Strompreis rund 3000 Stunden auf den Wert von 0 €/MWh. Import- und Bezugskosten weiterer Energieträger sind in Tabelle 3 aufgeführt.

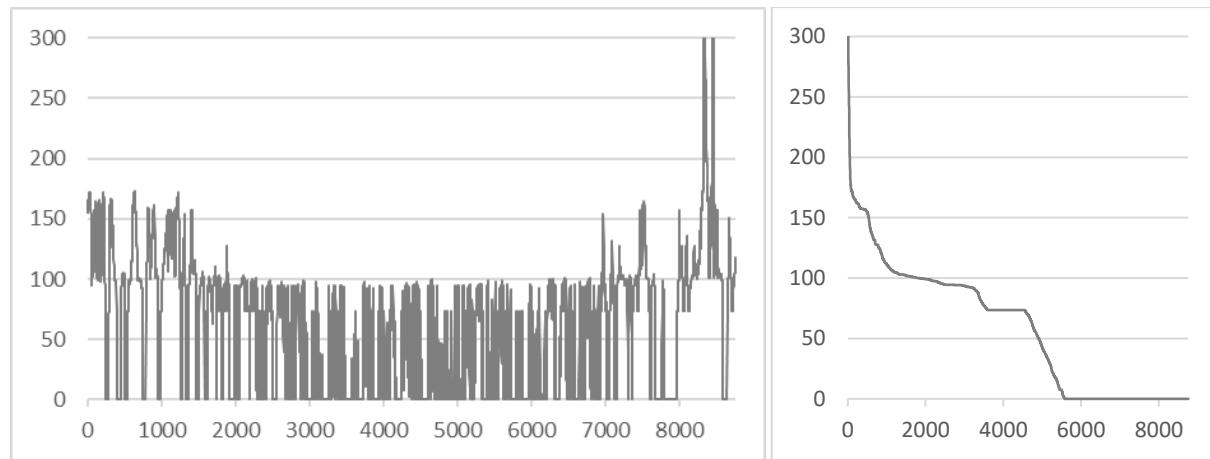


Abbildung 2: Ganglinie (links) und Dauerlinie (rechts) des Börsenstrompreis 2045 in €/MWh

Tabelle 3: Import- bzw. Bezugspreise ausgewählter Energieträger für 2045 in €/MWh

Energieträger	Preis in €/MWh
Biomasse	35,6
Wasserstoff	100
Synthetischer Kraftstoff	200

## 5. ERGEBNISSE DER ENERGIESYSTEMOPTIMIERUNG

Zunächst wurde eine freie Optimierung des Energiesystems Thüringen durchgeführt (in den folgenden Grafiken ganz rechts unter dem Label ‚frei‘ dargestellt). Dabei wurde – wie in allen anderen Simulationsdurchläufen auch – kein Treibhausgasbudget mehr für den Energiesektor zur Verfügung gestellt. Es ist in Abbildung 3 zu erkennen, dass sowohl das Windkraft- als auch das Freiflächenphotovoltaikpotenzial gemäß Tabelle 1 vollständig ausgeschöpft werden. Dies führt zu einem hohen Exportüberschuss an Elektrizität (Abbildung 4) und auch insgesamt zu einem bilanziellen energetischen Exportüberschuss.

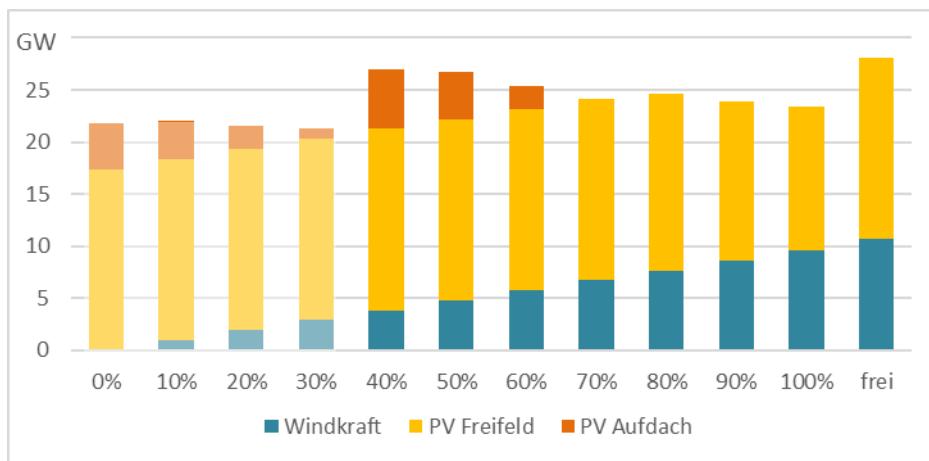


Abbildung 3: Installierte Leistungen von Windkraft und Photovoltaik in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Windkraftpotenzials.

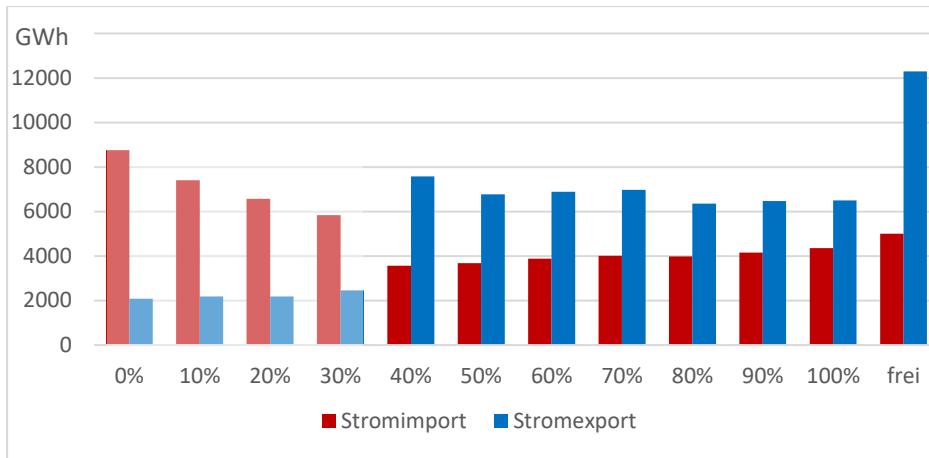


Abbildung 4: Jahressummen des jährlichen Stromimports und -exports in das Energiesystem Thüringen

Um der Forderung aus dem politischen Raum eines an den regionalen Energiebedarfen orientierten Ausbaus der Windkraft Rechnung zu tragen, wurde im Folgenden eine Randbedingung eingeführt, welche die Jahressumme aller Energieimporte gleich der Jahressumme der Energieexporte setzt. In den hier durchgeföhrten Optimierungsrechnungen ergaben sich lediglich Importe von Strom, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen sowie Stromexporte:

$$\sum_{i=1}^{8760} (E(i)_{\text{el}}^{\text{imp}} + E(i)_{\text{H2}}^{\text{imp}} + E(i)_{\text{PtL}}^{\text{imp}}) \stackrel{!}{=} \sum_{i=1}^{8760} E(i)_{\text{el}}^{\text{exp}} \quad (1)$$

Es lässt sich feststellen, dass die vorliegende Randbedingung eine Begrenzung der Exporte zur Folge hat (in den Abbildungen rechts unter dem Label ‚100%‘ dargestellt) und insgesamt weder das Wind- noch das Freiflächenphotovoltaikpotenzial vollständig ausgeschöpft werden. Der Ausbau der Windkraft liegt bei 9,6 GW und der der Photovoltaik bei 13,8 GW. Der verbleibende Exportüberschuss bei Elektrizität (Abbildung 4) dient zur bilanziellen Deckung der Energieimporte chemischer Energieträger nach Thüringen. Eine solche Begrenzung der Elektrizitätsexporte führt zu höheren volkswirtschaftlichen Gesamtkosten des Energiesystems Thüringen: gegenüber der freien Optimierung liegen diese mit gut 3,2 Mrd. € knapp 8 Prozent darüber (Abbildung 5).

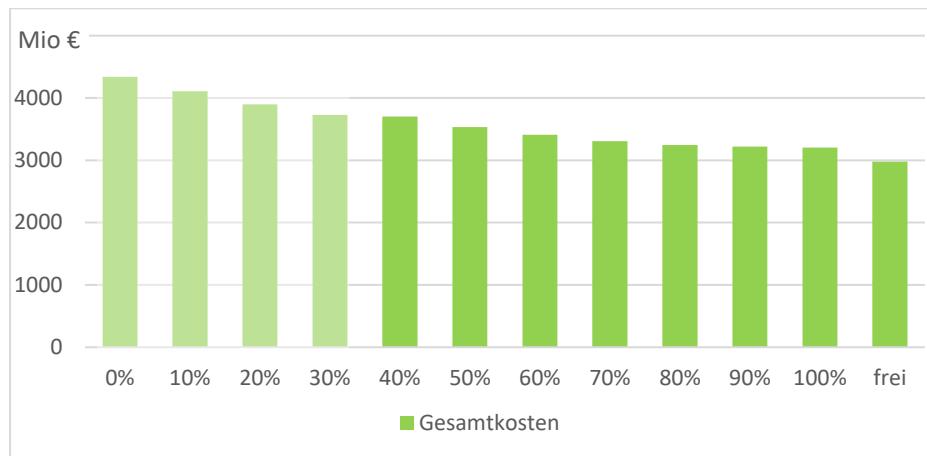


Abbildung 5: Volkswirtschaftliche Gesamtkosten des Energiesystems Thüringen

In einem letzten Schritt wurde nun ausgehend von 9,6 GW das zur Verfügung stehende Windkraftpotenzial schrittweise um 10 Prozent bis auf Null reduziert. Für die Optimierungsrechnungen wurde weiterhin die Randbedingung (1) angesetzt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen mit den Labeln ‚90%‘ bis ‚0%‘ gekennzeichnet. Es lässt sich feststellen, dass der Optimierer die jeweils verfügbare Windleistung stets in vollem Umfang nutzt. Zunächst wird die fehlende Windkrafterzeugung durch einen stärkeren Ausbau der Photovoltaik kompensiert. Die Gesamtkosten (Abbildung 5) steigen dadurch jedoch deutlich an, da die entstehende Winterstromlücke durch den Import von vergleichsweise teurem Strom aus dem europäischen Übertragungsnetz gedeckt werden muss, wohingegen für die Exporte von Photovoltaikstrom 2045 kaum noch Erlöse erwartet werden können (Abbildung 2). Für 40 %, d.h. eine zur Verfügung stehende Windleistung von 3,8 GW sind die Gesamtkosten gegenüber der freien Optimierung bereits um 25 Prozent angestiegen – insbesondere durch höhere Kosten in der Elektrizitätsbereitstellung.

Wird das verfügbare Windpotenzial auf einen Wert unterhalb von 40 % reduziert, so ist das Optimierungsproblem nicht mehr lösbar. D.h. die fehlende Windkrafterzeugung kann nicht mehr durch andere Erzeugungstechnologien kompensiert werden, da diese ebenfalls bereits an ihrer Potentialgrenze angelangt sind. Für die unter den Labeln ‚30%‘ bis ‚0%‘ dargestellten Ergebnisse wurde die Randbedingung (1) aufgehoben und der Anspruch einer regional ausgeglichenen Energiebilanz aufgegeben. Thüringen wird zum Energieimporteur (Abbildung 4) bei gleichzeitig weiter ansteigenden Gesamtkosten (Abbildung 5). Für den Extremfall, dass Thüringen vollständig auf Windkraft verzichtet, ergeben sich mit 4,3 Mrd. € gut 46 Prozent höhere Gesamtkosten als bei einer Nutzung des Flächenpotenzials von 2,2 Prozent der Landesfläche gemäß [3].

Neben den Auswirkungen auf den Elektrizitätsaustausch hat das zur Verfügung stehende Windkraftpotenzial auch Auswirkungen auf andere Energiesektoren. In Abbildung 6 ist beispielsweise der Einsatz von Elektrodenheizkesseln und Wärmespeichern im Bereich der Fernwärmebereitstellung dargestellt.

Die Verfügbarkeit von ausreichend Elektrizität im Winterhalbjahr ermöglicht eine kostengünstige Power-to-Heat Lösung unter der Nutzung regionaler Wärmespeicher.

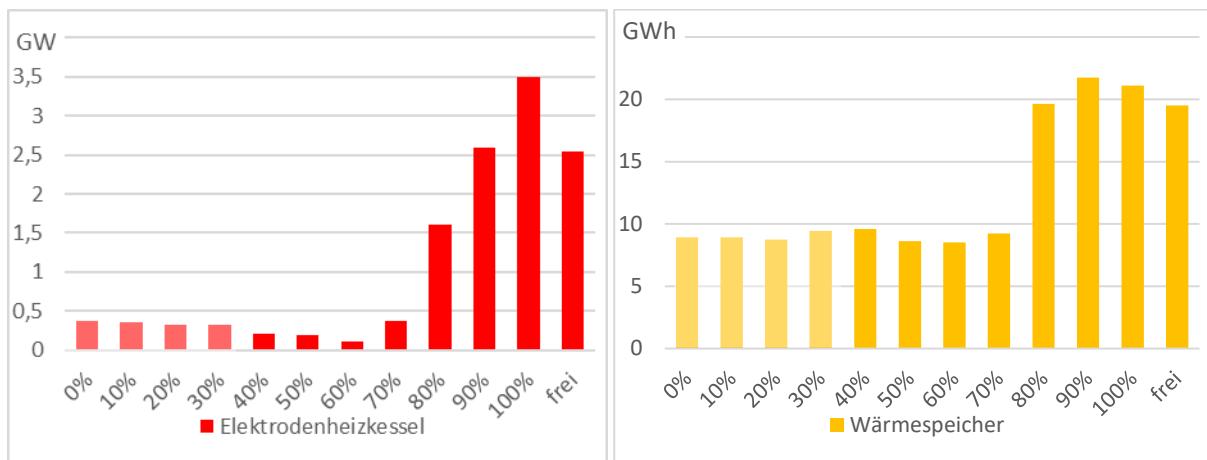


Abbildung 6: Fernwärmebereitstellung mittels Elektrodenheizkessel (links) und lokalen Wärmespeichern (rechts)

Der verstärkte Rückgriff auf Biomasse zur Bereitstellung von Fernwärme stellt keine Option dar, da die zur Verfügung stehende Biomassepotenziale an festen Brennstoffen und Biomasse-Substrat in allen Optimierungsläufen bereits vollständig genutzt werden. Insbesondere ist für die bestehenden Biogasanlagen eine Umrüstung auf die Produktion von Biomethan vorteilhaft, um den auch 2045 bestehenden Bedarf an Brenngasen zu decken.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegenden Berechnungen haben am Beispiel Thüringens gezeigt, dass der Anteil der Windkraft am Energiemix einen erheblichen Einfluss auf die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten des Energiesystems hat. Selbst eine vergleichsweise defensive politische Vorgabe eines an den regionalen Bedarfen orientierten Windkraftausbaus führt auf einen Flächenbedarf von knapp 2 Prozent der Landesfläche und damit annähernd an die Ziele aus dem Windenergieländerbedarfsgesetz.

Die Berechnungen im Fall ‚100%‘ haben ein optimales Verhältnis zwischen der Windkraft- und Photovoltaikleistung von 1 zu 1,4 ergeben. Das entspricht einem Energiebeitrag von 1 zu 0,6. Das bedeutet, dass bei dem in Thüringen vorliegenden Lastgang des Elektrizitätsbedarfs, Windkraft einen größeren Beitrag leisten muss als Photovoltaik. Abweichungen von diesem Verhältnis zu Ungunsten der Windkraft führen zu deutlich höheren Kosten.

Die Autorinnen und Autoren dieses Beitrags plädieren nachdrücklich dafür, bei Diskussionen über „technologieoffene“ Transformationsprozesse die jeweiligen Kosten der einzelnen Optionen klar zu benennen.

Die Entwicklung des Energiesystemmodells Thüringen ist Bestandteil des Projekts Zero Carbon Cross Emission (ZO.RRO II) und wurde durch das Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie, Naturschutz und Forsten gefördert.

## LITERATUR

- [1] Wesselak, V. (Hg.): So geht's – Wie Thüringen klimaneutral wird. Die Ergebnisse der Energiesystemmodellierung. Nordhausen 2021
- [2] Wesselak, V., Oberdorfer, A., Reinhardt, T., Schmidt, C., Hofmann, L: Transformationspfade für ein klimaneutrales Thüringen. 28. Symposium Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, Stralsund 2021
- [3] Windenergieflächenbedarfsgesetz vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1353)
- [4] Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie (Hg.): Pumpspeicherkataster Thüringen - Ergebnisse der Potenzialanalyse. Erfurt 2011
- [5] Murzakulova, Z.: Stand und Entwicklung des Rechenzentrumsstandorts Deutschland. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin 2025
- [6] Energy Brainpool (Hg.), Energy Brainreport für Deutschland. Berlin 2024.
- [7] Wesselak, V. (Hg.): So geht's 2 – Neue Ergebnisse der Energiesystemmodellierung. Nordhausen (in Vorbereitung)

## ANHANG: STRUKTUR DES DEN BERECHNUNGEN ZUGRUNDELIEGENDEN ENERGIESYSTEMMODELLS THÜRINGEN.

