

# Kernergebnisse der Masterarbeit: "Pfade zur hessischen Klimaneutralität"



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**EINS**

Energy Information Networks and Systems

Leon Flöer  
20. April 2022

Nachstehend werden die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zu möglichen Pfaden eines klimaneutralen Hessens und deren Auswirkungen auf das Energiesystem in Hessen dargestellt. Die Untersuchung erfolgte im Rahmen einer Master Thesis am Fachgebiet EINS an der TU Darmstadt. Die Untersuchung erfolgt mittels Szenarien, die unterschiedliche technische Entwicklungen und verschiedene Verhaltensweisen berücksichtigen. Das **Buisness As Usual** (BAU) Szenario basiert auf dem festgelegten CO<sub>2</sub> - Preis im BEHG (Brennstoffemissionshandelsgesetz) mit einer linearen Steigerung des Preises ab dem Jahr 2026, abgeleitet aus der Steigerungsrate der Jahre 2021 bis 2026. Eine Erfüllung der Treibhausgas (THG) - Minderungsziele der Bundesregierung ist nicht vorausgesetzt. Das Szenario **Referenz** erfüllt die THG - Minderungsziele (fortlaufend Klimaziele) aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) von 65 % bis 2030, 88 % bis 2040 und 100 % bis 2045 und erfolgt unter aktuell erwartbaren Entwicklungen. Auch die folgenden Szenarien erfüllen die Klimaziele. Im Szenario **Suffizienz** wird untersucht, wie sich der Einfluss einer Veränderung im Verhalten zu mehr Verzicht und bewussteren Konsumententscheidungen auswirkt. Zuletzt wird im **BANANA** (Built Absolutely Nothing Anywhere Near Anybody) Szenario betrachtet, welche Effekte ein Verbleib bei vorhandenen Technologien und eine weitgehende Verweigerung von Großprojekten haben. In den vorgestellten Szenarien sind weiterhin Auswirkungen von unterschiedlichen Annahmen zum Import von Strom, verringerten Kosten für Erneuerbare Energien sowie unterschiedlichen Preisen und Emissionsfaktoren für Wasserstoff untersucht worden. Das Modell ist ein kostenminimierendes Optimierungsmodell, die Funktionsweise ist in <sup>1</sup> dargestellt.

Das Optimierungsmodell und die hessischen Statistiken nutzen unterschiedliche Methoden, um die THG - Emissionen für Hessen zu ermitteln. Der Grund dafür ist der unterschiedliche Umgang mit den Emissionen des Imports von Strom. Innerhalb des Modells werden die THG - Emissionen des importierten Stroms berücksichtigt (Scope 2 Betrachtung). In den offiziellen Statistiken ist dies nicht der Fall, da die THG - Emissionen nicht auf hessischem Boden entstehen (Scope 1 Betrachtung). Aus der Optimierung ergeben sich somit energiebedingte THG - Emissionen für Hessen von 44,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq. im Jahr 2020, wohingegen in den hessischen Statistiken ein Wert von 34,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq. angegeben wird. <sup>2</sup>

## **1 Die Umsetzung der deutschen Klimaziele ist in Hessen aus technischer Sicht möglich und erfordert, dass im Rest Deutschlands dieselbe Entwicklung stattfindet sowie die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zum Import.**

Über die stundenscharfe Optimierung und Auswahl von geeigneten Zeitabschnitten zur Betrachtung des Energiesystems ergibt sich, dass die Versorgung in jedem Verbrauchssektor gewährleistet ist, und dass ein großer Teil des Verbrauchs aus volatilen erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann. Der Weg zur Erreichung der Klimaziele ist dabei stark abhängig von den gewählten Rahmenbedingungen und erfordert in jedem Fall eine sofortige Steigerung des Ausbaus erneuerbarer Energien.

## **2 Die Erreichung der Klimaziele in Hessen führt unter Einhaltung eines kostenoptimalen Pfades zu einer Reduktion des Primärenergiebedarfs um 21 - 40 %. Gas wird als Brückentechnologie bis 2045 benötigt.**

Im Szenario Referenz sinkt der Primärenergiebedarf von 183 TWh im Jahr 2020 auf 144 TWh im Jahr 2030 und weiter auf 125 TWh im Jahr 2045. Zum einen bedarf es für die starke Reduktion bis 2030 den Ersatz von rohstoffbasierten durch strombasierte Technologien in den Sektoren Wärme und Verkehr. Diese Sektorenkopplung ist als Schlüsselfaktor zum Erreichen der Ziele anzusehen. Zum anderen ist eine gleichzeitig stattfindende starke Reduktion der THG - Emissionen der Stromerzeugung durch den

<sup>1</sup>J. Barbosa, C. Ripp und F. Steinke, „Accessible Modeling of the German Energy Transition: An Open, Compact, and Validated Model,“Energies, Jg. 14, Nr. 23, 2021.

<sup>2</sup>Hessisches Statistisches Landesamt, „Bericht zu den CO<sub>2</sub> - Emissionen in Hessen Bilanzjahr 2019“, 2021.

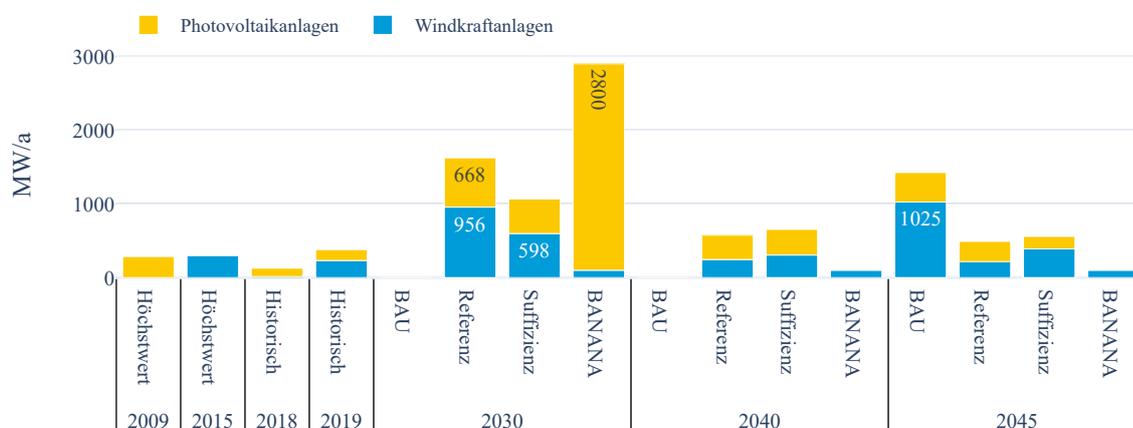


Abbildung 1: Notwendige Ausbauraten für Windkraft- und Photovoltaikanlagen.

Ausbau erneuerbaren Energien notwendig. Ein Energiesystem, in dem die Sektorenkopplung und Reduktion der THG - Emissionen der Stromerzeugung parallel erfolgen, bietet die beste Option, die Klimaschutzziele kostengünstig und im gegebenen Zeitrahmen zu erreichen. Trotz der Veränderungen werden fossile Brennstoffe weiterhin bis 2045 genutzt. Dabei nimmt Gas die wichtigste Rolle ein, da dieses bis 2045 als Brückentechnologie in der Strom- und Wärmeerzeugung benötigt wird. In allen Szenarien, die die Klimaziele erreichen, wäre bereits in 2020 der Neubau von Technologien, die Kohle und Ölprodukte als Brennstoff einsetzen, eingestellt worden.

### 3 Im Jahr 2030 ist zur Erreichung der Klimaziele in Hessen eine installierte Leistung von 10 - 14 GW für Windkraftanlagen notwendig. Die Entwicklung der installierten Leistung für Photovoltaikanlagen ist abhängig von den Importpreisen für grünen Wasserstoff.

Die Potenzialgrenze von 14 GW für Windkraftanlagen, beruhend auf der 2% - Landnutzungsregel, wird in den Szenarien Referenz und Suffizienz bis 2045 nahezu erreicht. Die installierte Leistung für Photovoltaikanlagen bewegt sich zwischen 9 - 28 GW im Jahr 2045. Diese Diskrepanz ist darauf zurückzuführen, dass ein geringerer Wasserstoffpreis zu einer geringeren installierten Leistung von Photovoltaikanlagen führt. Wohingegen geringere Kosten für Photovoltaikanlagen und Speichertechnologien zu höheren Ausbauraten führen. Weiterhin führen Einschränkungen für den Ausbau von Windkraftanlagen, wie im BANANA Szenario, zu dem erheblich höheren Wert von 28 GW. Die notwendige installierte Leistung in 2045 beträgt im Vergleich zum Wert aus 2019 mindestens das Fünffache für Photovoltaik- und Windkraftanlagen.

### 4 Der Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen muss beschleunigt werden. Der notwendige jährliche Ausbau zur Erreichung der Klimaziele ist zeitweise drei bis vier mal höher als der bisher erreichte Höchstwert.

In Abhängigkeit vom Szenario und den Rahmenbedingungen ergeben sich erhebliche Unterschiede in den Ausbauraten, so ist im Referenz Szenario zur Erreichung der Klimaziele ein Ausbau von Windkraftanlagen von etwa 1000 MW pro Jahr im Zeitraum zwischen 2020 und 2030 notwendig. Im Suffizienz Szenario liegt dieser Wert bei 600 MW pro Jahr im gleichen Zeitraum. Unter der Beachtung der erheblich höheren Ausbauraten zum aktuellen Niveau, ist zu empfehlen, alle Maßnahmen zu verfolgen, die die Ausbauraten abflachen lassen. Maßnahmen auf die Hessen direkt Einfluss hat, sind die Reduktion des Strombedarfs aufgrund von effizienteren Technologien und eine Veränderung des Verhaltens zu mehr Suffizienz. Weitere Maßnahmen, wie die Erhöhung des Imports von Strom, respektive Wasserstoff, liegen nicht in der Entscheidungsgewalt Hessens.

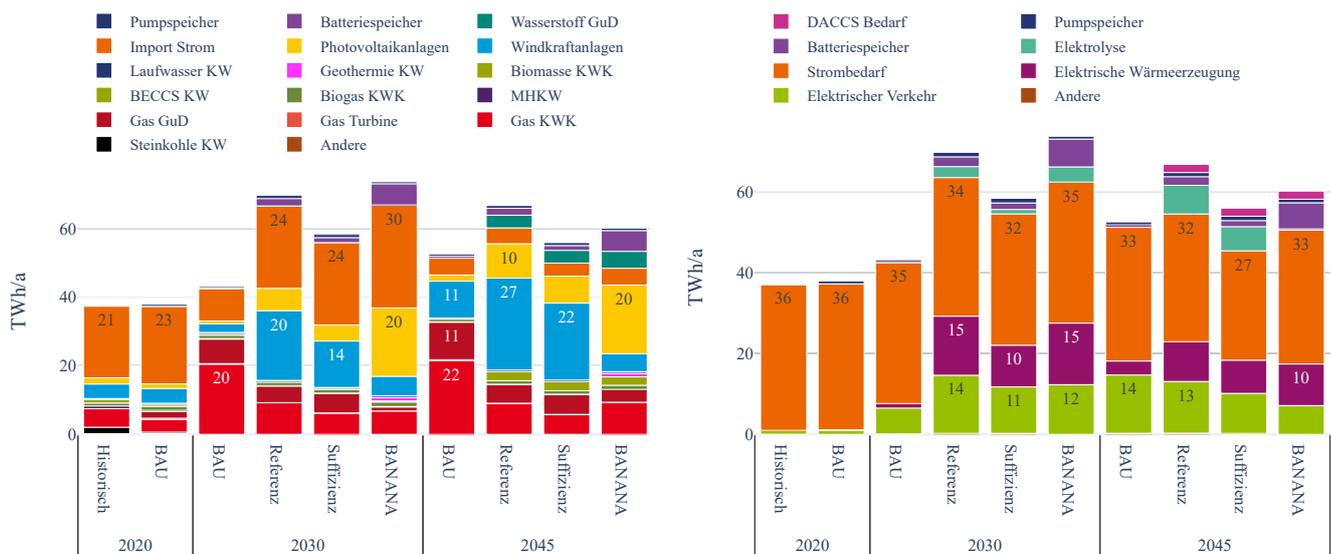


Abbildung 2: Stromezeugung- und Verwendung in 2030 und 2045 sowie eine Gegenüberstellung der Werte des Modells und der statistischen Werte Hessens in 2020. Der elektrische Verkehr und die elektrische Wärmeerzeugung fassen mehrere Technologien zusammen.

## 5 Bei einer Einhaltung der Klimaziele unter kostenoptimalen Bedingungen steigt der Strombedarf zum Vergleichsjahr 2020 um 60 - 100 % bis 2030. Bis 2045 verbleibt der Strombedarf weiter auf dem Niveau von 56 - 71 TWh.

Der Anstieg in 2030 ist auf die Elektrifizierung in den Sektoren Wärme und Verkehr zurückzuführen. Im Jahr 2020 hat Wärme einen Anteil von 0 % und Verkehr von 1 % am Stromverbrauch. Der Anteil des Wärmesektors am Stromverbrauch liegt im Jahr 2030 bei 18 - 21 % und des Verkehrssektors bei 20 - 21 %. Trotz einer Reduktion des Strombedarfs im Verkehr und der Wärme verbleibt der Wert in 2045 auf dem Niveau von 2030. Dies ist im Bedarf für Speicher und Technologien zum Lastausgleich begründet, wie Elektrolyseure und Batteriespeicher, die 2045 einen Anteil von etwa 15 - 19 % am Strombedarf haben. Die große Abweichung ist in den Unterschieden beim Ausbau von erneuerbaren Energien und der Nutzung von importiertem Wasserstoff begründet. Basierend auf den Ergebnissen wird empfohlen, den zu erwartenden Stromverbrauch im Hessischen Energiezukunftsgesetz anzupassen. Ein Wert von mindestens 60 TWh in 2030 und 65 TWh in 2045 bei einem Erreichen der Klimaziele wird als sehr wahrscheinlich angesehen. In Abhängigkeit der Entwicklung des Elektrifizierungsgrads in den Sektoren Wärme, Industrie und Verkehr und dem Bedarf für heimische Elektrolyseure kann dieser Wert auf über 70 TWh ansteigen. Aufgrund des erhöhten Strombedarfs ist es zu empfehlen, das aktuell ausgewiesene Potenzial für erneuerbare Energien anzupassen, insbesondere für Solarenergie. Die Anpassung des Potenzials für Solarenergie ist wichtig vor dem Hintergrund, dass die Potenziale für Biomasse, Wasserkraft und Geothermie nicht erhöht werden können. Erhebungen aus dem Solarkataster Hessen<sup>3</sup> und einer Potenzialstudie des Fraunhofer IWES<sup>4</sup> zeigen, dass eine Anhebung des Potenzials von Solarenergie vom aktuell ausgegebenen Wert von 6 TWh auf 20 - 28 TWh möglich ist.

## 6 Bis 2030 sind Gas- und Ölheizungen nahezu vollständig durch Wärmepumpen zu ersetzen, um die Klimaziele auf einem kostenoptimalen Pfad zu erreichen.

In 2030 hat die Wärmeerzeugung aus Wärmepumpen einen Anteil von 58 - 68 % am Wärmebedarf von Haushalten sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Ergänzt wird die Wärmeversorgung für Haushalte und GHD durch den steigenden Anteil von Fernwärme und die Nutzung von Biomasse. In 2045 ist der Anteil an Fernwärme nahezu doppelt so hoch wie im Vergleichsjahr 2019. Für die Bereitstellung von Fernwärme sind Wärmepumpen mit erhöhten Vorlauftemperaturen aus Abwärmequellen am besten geeignet. Weitere Erzeugungsquellen für Fernwärme sind Luftwärmepumpen, Gas- und Biomassekessel sowie die ausgekoppelte Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK). Um Wärmepumpen sowie saisonale Wärmespeicher ins Fernwärmenetz zu integrieren, bedarf es der Anpassung des Fernwärmenetzes auf Niedertemperaturen (< 95°C). Der Wärmebedarf kann in den Szenarien um 37 - 57 % gesenkt werden, abhängig von der Sanierungsrate, Sanierungstiefe und dem Nutzerverhalten.

<sup>3</sup>Hessisches Ministerium fuer Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung „Solar-Kataster Hessen Leitfadens zur Nutzung des Solar-Katasters,“ 2017.

<sup>4</sup>A. von Oehsen, Y.-M. Saint-Drenan und T. Stetz, „Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung,“ 2012.

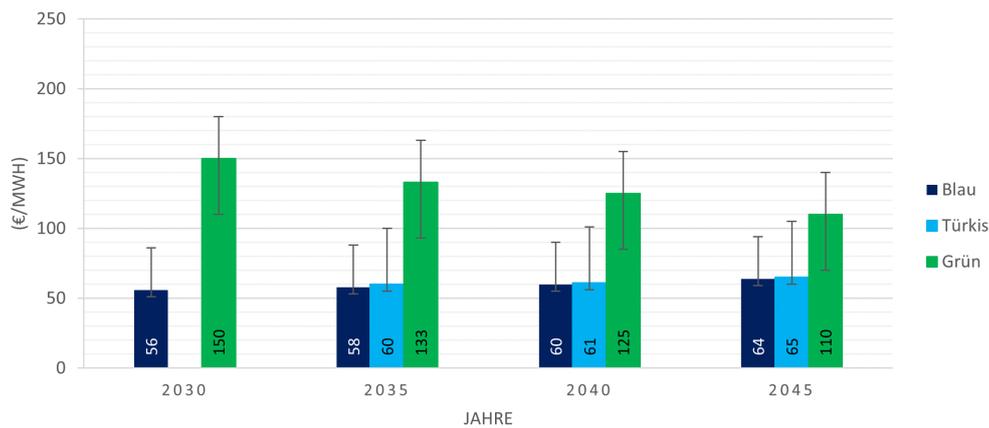


Abbildung 3: Angesetzter Wasserstoffpreis im Referenz Szenario und Differenz der Wasserstoffpreise

## 7 In 2045 wird die Bereitstellung von Mittel- und Hochtemperaturwärme in der Industrie auf klimaneutralen Brennstoffen basieren. Eine vollständige Elektrifizierung der Wärmebereitstellung ist nicht zu erwarten.

Die nicht vorhandene Elektrifizierung im Mittel- und Hochtemperaturbereich ist ein Produkt der eingeschränkten Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom in Hessen, der konstant bereitgestellt werden kann. Aus diesem Grund werden klimaneutrale Brennstoffe benötigt. Die direkte Nutzung von Biomasse ist aufgrund der vorhandenen Eigenschaften nur bis zu Temperaturen von 500 °C möglich. Wasserstoff und synthetische Brennstoffe sind somit die einzigen Optionen, die in den Szenarien verwendet werden, um den Hochtemperaturbereich (> 500 °C) zu dekarbonisieren. In allen Szenarien, die die Klimaziele erfüllen, werden im Niedertemperaturbereich (100 - 150 °C) effiziente Hochtemperaturwärmepumpen eingesetzt, wobei zu berücksichtigen ist, dass reale Industrieprozesse unterschiedliche Voraussetzungen haben, die eine Nutzung verhindern könnten.

## 8 Die Umstellung des Kraftwerkparcs auf flexible Kraftwerke kombiniert mit Batterien und Power-to-X Technologien ist für die Gewährleistung der Stromversorgung in 2030 erforderlich. Die notwendige Residuallast sollte im deutschen Verbund betrachtet werden aufgrund der hohen Stromimporte Hessens.

Der steigende Anteil an volatilen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien führt zu einem Energiesystem, das nicht mehr bedarfsgerecht Strom produziert, sondern flexibel auf die teilweise vorhersehbare Produktion an Strom reagiert. Die Flexibilisierung erfolgt zum einen über die Nutzung von Power-to-Heat Technologien in Kombination mit Wärmespeichern. Dies ist aber nicht ausreichend. Für den stündlichen Lastausgleich werden Batterien und Elektrolyseure benötigt. Aus den Szenarien ergibt sich eine benötigte Leistung für Batteriespeicher von 2 - 6 GW für die kurzfristige Speicherung von Strom im Jahr 2045. Darüber hinaus werden für den kurzfristigen Lastausgleich Elektrolyseure mit einer installierten Leistung von 4 - 5 GW benötigt. Für die Überbrückung von längeren Perioden ohne erneuerbare Stromerzeugung werden flexible Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung von 7 - 11 GW benötigt. Diese Residuallast ist notwendig, um in Zeiten des Entfalls der Stromerzeugung aus volatilen erneuerbaren Energien, die Stromversorgung zu gewährleisten. In den Kraftwerken wird hauptsächlich Gas bis 2040 eingesetzt, was in den Folgejahren bis 2045 durch Wasserstoff sowie synthetisches Gas als Brennstoff ersetzt wird.

## 9 Zur Erreichung der Klimaziele wird Hessen in 2045 auf den Import von grünem Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen angewiesen sein. Der Anteil von Importen am Wasserstoffbedarf liegt bei mindestens 80 %. Das hessische Energiesystem reagiert sensibel auf Preisentwicklungen für den Import von grünem Wasserstoff.

Die Diskrepanz im Bedarf an Wasserstoff (46 - 68 TWh) basiert auf den unterschiedlichen Wasserstoffpreisen, die in den Szenarien betrachtet werden. In Abbildung 3 ist der Wasserstoffpreis für das Referenz Szenario sowie das Spektrum der Preise dargestellt, die in den weiteren Szenarien genutzt werden. Die Sensibilität des Energiesystems im Bezug auf die Entwicklung des Wasserstoffpreises zeigt sich z. B. darin, dass es bei einem Wasserstoffpreis von unter 90 €/MWh in 2045 zu einem Kraftstoffwechsel im Pkw Verkehr von Strom zu Wasserstoff kommt. Ebenso verringert sich die Kapazität der erneuerbaren Energien auf die Minimalwerte, dargestellt

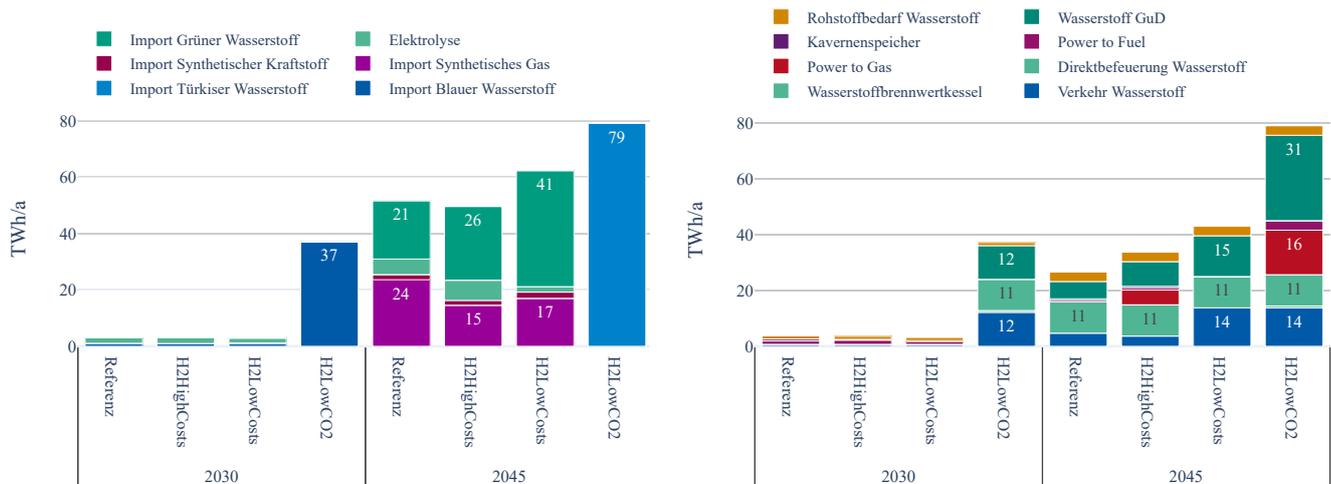


Abbildung 4: Wasserstoffbezug- und -verwendung in 2030 und 2045 unter Einbezug unterschiedlicher Preise für den Import grünen Wasserstoffs und verringerter CO<sub>2</sub>-Intensitäten für türkisen und blauen Wasserstoff.

in Ergebnis 3. Bei einem Preis von 125 €/MWh erfolgt eine gegenteilige Entwicklung, die z. B. zu einer deutlich erhöhten installierten Leistung von Wind- und Photovoltaikanlagen führt.

Die Nutzung von Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen ist von besonderer Wichtigkeit für Sektoren, in denen eine Elektrifizierung nicht möglich oder kostenoptimal ist. Darunter fallen für Hessen der Schwerlastverkehr, die Bereitstellung von Ausgangsstoffen für die Chemie, die Nutzung für Hochtemperaturprozesse in der Industrie und die Verwendung als Brennstoff in Kraftwerken. Elektrolyseure bieten die Möglichkeit erneuerbaren Strom in Hessen zu verwenden, um Wasserstoff und darauffolgend synthetische Brennstoffe herzustellen. Darüber hinaus können Elektrolyseure durch schnelles An- und Abfahren zum Lastausgleich beitragen. Und zuletzt können Wasserstoff und synthetische Brennstoffe für Tage bis Monate gespeichert werden und bieten somit eine Option Strom langfristig zu speichern, was Wasserstoff zu einem essenziellen Bestandteil des zukünftigen Energiesystems macht. Die Szenarien zeigen, dass Elektrolyseure in Hessen kosteneffizient genutzt werden können und zu einem Anteil von 10 - 18 % am Wasserstoffbedarf in 2045 beitragen. Dennoch wird das Erreichen der Klimaschutzziele über die Möglichkeit des Imports von grünem Wasserstoff entschieden. Im Modell gilt die Annahme, dass ein Import von grünem Wasserstoff ab 2030 unbegrenzt möglich ist. Die Annahme wurde getroffen unter Beachtung der Ergebnisse einer Studie des Forschungsprojektes SCI4climate.NRW und den ausgegebenen Zielen der Wasserstoffstrategien Deutschlands, Norwegens und Großbritanniens.<sup>5</sup> Auch die Annahme für 2030 ist mit der Ungewissheit behaftet, nicht zu wissen, in welchem Rahmen ein Import von Wasserstoff möglich sein wird. Aus diesem Grund ist für Hessen sowie allgemein für Deutschland zu empfehlen, bei der Projektförderung von grünem Wasserstoff eine führende Rolle einzunehmen, da der Erfolg der Energiewende davon abhängt. Außerdem leitet sich daraus die Empfehlung ab, zunächst die Potenziale in Hessen auszuschöpfen bis der mögliche Umfang von Wasserstoffimporten absehbar ist.

## 10 Blauer und türkiser Wasserstoff sind mittelfristig die kostenoptimale Option, um eine Wasserstoffwirtschaft aufzubauen. Langfristig ist die Nutzung von grünem Wasserstoff die einzige klimaneutrale Option.

Die ungewisse Lage beim Import von grünem Wasserstoff erfordert weitere Optionen, die eine kostengünstige und emissionsarme Transformation in eine Wasserstoffwirtschaft ermöglichen. Dafür bieten sich blauer (Dampfgasreformierung mit CCS) und türkiser (Kvaerner Verfahren) Wasserstoff an, die aus Gas in Kombination mit der Nutzung von Technologien der Kohlenstoffabscheidung (CCS) hergestellt werden können. Blauer und Türkiser Wasserstoff haben Kosten, die sehr wahrscheinlich bis 2040 unter denen von grünem Wasserstoff liegen werden.<sup>6</sup> Im Fall von blauem Wasserstoff liegen bereits Erfahrungen mit der Herstellung vor. Zu priorisieren ist die Herstellung von türkischem Wasserstoff, da der Kohlenstoff dort in fester Form abgeschieden wird, wodurch die Klimaneutralität besser gewährleistet werden kann. Im Fall von türkischem Wasserstoff ist zu berücksichtigen, dass vor 2030 keine industrielle Produktion zu erwarten ist. Eine Produktion um das Jahr 2035 herum wird als wahrscheinlich eingeschätzt.<sup>6</sup> Aus der Szenarienanalyse lassen sich als geeignete Verwendungsgebiete die Bereitstellung von Wasserstoff als Rohstoff für die Chemie, der Einsatz in grundlastfähigen Kraftwerken und Hochtemperaturprozessen der Industrie ableiten. Für die Nutzung ist zu empfehlen, Rahmenbedingungen und Richtlinien zu formulieren, die die Methanemissionen aus Leaken berücksichtigen und verhindern, dass

<sup>5</sup> SCI4climate.NRW, Wasserstoffimporte, Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030, Gelsenkirchen, 2021.

<sup>6</sup> G. Brändle, M. Schönfish und S. Schulte, „Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen,“ Applied Energy, Jg. 302, S. 117481, 2021

---

durch die Nutzung der Ausbau erneuerbarer Energien behindert wird. Langfristig bleibt grüner Wasserstoff die einzige Option für eine klimaneutrale Energieversorgung. Blauer und Türkiser Wasserstoff sind auf die Nutzung von Gas angewiesen und somit immer für Emissionen durch die Verflüchtigung von Gas verantwortlich.

---

### **11 Ein Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge von 70 - 80 % am Pkw Bestand im Jahr 2030 ist unverzichtbar für das Einhalten der Klimaziele auf einem kostenoptimalen Pfad in Hessen. Eine Mobilitätswende vom Individual- zum Öffentlichen Verkehr ist am förderlichsten für die Reduktion der Treibhausgasemissionen.**

---

Bis 2045 erfolgt eine nahezu vollständige Elektrifizierung des Pkw Bestandes durch batterieelektrische Fahrzeuge. Die mittelfristige Zukunft im Pkw Bereich liegt eindeutig bei batterieelektrischen Fahrzeugen. Ab 2045 erfolgt bei einem Wasserstoffpreis von unter 90 €/MWh ein Ausbau von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen als Antrieb. Langfristig kann die Möglichkeit bestehen, dass ein erneuter Wechsel in der dominierenden Antriebstechnologie erfolgt. Wie bereits zuvor erwähnt, ist dies abhängig von der Entwicklung des Wasserstoffpreises. Ein Verlass auf eine solche Entwicklung ist mit erheblichen Risiken verbunden. Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe werden nur für Pkws verwendet, wenn in den Szenarien eine Nutzung vorgegeben wird, wie z. B. im BANANA Szenario. Im Suffizienz Szenario reduziert sich der Endenergiebedarf bis 2045 um 70 % gegenüber 2020. Im Referenz Szenario erfolgt eine Reduktion um 64 % und im BANANA Szenario um 45 %. Der Unterschied resultiert aus dem geringeren Bestand von Pkws durch die Verlagerung der Verkehrsleistung auf öffentliche Verkehrsmittel und die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene. Insgesamt zeigt sich, dass eine Verlagerung des individuellen Verkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel die beste Option ist, um Energie einzusparen und die Klimaziele zu erreichen. Dem Schienenverkehr kommt eine Schlüsselrolle zu, um dies zu erreichen. Im Referenz Szenario wird von einer Verdopplung der Verkehrsleistung im Personen- sowie Güterverkehr für die Schienen ausgegangen. Das Erreichen der Klimaziele wird insbesondere davon abhängig sein, ob es gelingt die notwendige Schieneninfrastruktur bereitzustellen. Die Infrastruktur wird im Straßengüterverkehr ebenfalls von entscheidender Bedeutung sein, denn abhängig von der Antriebstechnologie, wird diese angepasst werden müssen. Batterien, Brennstoffzellen und Oberleitungen sind als Antriebstechnologien am wahrscheinlichsten.<sup>7</sup>

---

### **12 Eine Veränderung des Verhaltens zu mehr Suffizienz führt zu einer Reduktion der Kosten um 15 % und einer Reduktion des Primärenergiebedarfs um 12 % im Vergleich zum Referenz Szenario.**

---

Eine Veränderung des Verhaltens zu mehr Suffizienz führt zur Reduktion des Strombedarfs, geringeren Zubauraten für Wind- und Photovoltaikanlagen und geringeren Gesamtkosten im Vergleich zu den Szenarien Referenz und BANANA. Darüber hinaus ist die Anpassung des Verhaltens die einzige Option, die kurzfristig zu einer Verbrauchsreduktion führen kann. Dabei ist festzuhalten, dass die Politik eine Veränderung des Verhaltens zu mehr Suffizienz begünstigen kann, aber schlussendlich es die Aufgabe jedes Einzelnen ist, diese Option wahrzunehmen.

Ein Verhalten, wie im BANANA Szenario untersucht, erschwert das Erreichen der Klimaziele erheblich. Der Anteil von Strom- und Wasserstoffimporten am Primärenergiebedarf liegt im Jahr 2045 bei 62 % und die Kosten erhöhen sich um 26 % gegenüber dem Referenz Szenario. Darüber hinaus erhöht ein vermehrtes Verlassen auf den Import von Wasserstoff die Wahrscheinlichkeit die Klimaschutzziele zu verfehlen, aufgrund der bereits erwähnten Ungewissheit, wie sich die Importkapazitäten entwickeln werden.

Das Verhalten jedes Einzelnen wird sehr wahrscheinlich darüber entscheiden, ob ein Einhalten der Klimaziele gelingen kann. Nichtsdestotrotz haben sowohl privatwirtschaftliche Unternehmen als auch die Politik die Verantwortung, alles Erforderliche zu tun, um die Klimaziele zu erreichen.

---

### **13 Für das Erreichen von Klimaneutralität im Jahr 2045 ist die Nutzung von CCS-Technologien notwendig, um die Restemissionen aus Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Industrieprozessen zu neutralisieren.**

---

Im Jahr 2045 ergeben sich abgeschätzte Restemissionen von etwa 2 - 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq.. Für die prozessbedingten Emissionen in der Kalk- und Zementindustrie bietet sich die direkte Abscheidung innerhalb der Anlagen an, aufgrund des hohen Anteils von CO<sub>2</sub> im Abgas. Für die restlichen Emissionen ist eine Kombination von DACCS (Direct Air Capture and Storage) und BECCS (Bio Energy Capture and Storage) zu empfehlen. Innerhalb des Modells werden 2045 ca. 80 % des vorhandenen Potenzials an Biomasse in Hessen für BECCS genutzt. Aus diesem Grund wird angeraten, eine zukünftige Strategie für den Umgang mit Biomasse zu entwerfen, die die zukünftige Notwendigkeit von CCS berücksichtigt.

---

<sup>7</sup>S. Kühnel, F. Hacker und W. Görz, „Oberleitungs-LKW im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr“, Öko-Institut, Berlin/Germany, 2018.

Tabelle 1: Übersicht über Annahmen der einzelnen modellierten Szenarien

	Maßnahmen	Hessen 2020	BAU	Referenz	Suffizienz	BANANA
Rahmenbedingungen	Entwicklung Treibhausgas - Emissionen	-	-	Reduktion um 65 % bis 2030, um 88 % bis 2040, um 100 % bis 2045		
	CO <sub>2</sub> - Preis	-	2020: 5 €/t CO <sub>2</sub> , 2021: 25 €/ t CO <sub>2</sub> Bis 2045 erfolgt ein linearer Anstieg auf einen Wert von 217 €/ t CO <sub>2</sub>			
*Haushalte und GHD	Sanierungstiefe (kWh/m <sup>2</sup> )					
	- Einfamilienhäuser	75			60	
	- Mehrfamilienhäuser	58			41	
	- Gewerbe	75			60	
	Energetische Sanierungsrate					
- Haushalte	1 %	1,6 %	2,6 %	1,8 %	1,6 %	
- Gewerbe	1,1 %	1,6 %	2,2 %	2 %	1,6 %	
**Verkehr	Bestand Pkw in Mio. FZ	3,75	3,66	2,44	1,88	3,75
	Verkehrsleistung Personenverkehr in Mrd. Pkm	95	96	89	80	101
	- Pkw	75	75	50	39	81
	- Schienenverkehr	7	8	20	21	7
	- ÖPSV + Fuß-/Radverkehr	11	12	17	20	11
	Verkehrsleistung Güterverkehr in Mrd. tkm	58	75	74	64	86
	- Lkw/LNF	45	52	52	41	66
	- Schienenverkehr	9	17	16	17	13
	- Binnenschiff	4	6	5	6	7

\*Werte für die Szenarien BAU, Referenz, Suffizienz und BANANA beziehen sich auf das Jahr 2045

\*\*Werte für die Szenarien BAU, Referenz, Suffizienz und BANANA beziehen sich auf das Jahr 2050

Tabelle 2: Übersicht der Kernergebnisse

Ergebnisse	Hessen 2020	*BAU	*Referenz	*Suffizienz	*BANANA	
Primärenergiebedarf + Anteil Gesamtbedarf	Gas	61 TWh (33 %)	80 TWh (63 %)	-	-	-
	Erneuerbare Energien	19 TWh (10 %)	25 TWh (20 %)	50 TWh (40 %)	43 TWh (40 %)	38 TWh (26 %)
	Import Strom	23 TWh (12 %)	5 TWh (4 %)	4,6 TWh (4 %)	3,8 TWh (3 %)	5 TWh (3 %)
	Import Wasserstoff	-	7 TWh (5 %)	46 TWh (37 %)	42 TWh (38 %)	68 TWh (47 %)
	Fossile Kraftstoffe	74 TWh (41 %)	4 TWh (3 %)	-	-	-
Stromsektor	Strombedarf	38 TWh	53 TWh	67 TWh	56 TWh	60 TWh
	- Anteil Verkehr	1 %	27 %	19 %	18 %	12 %
	- Anteil Wärme	0 %	7 %	15 %	15 %	17 %
	- Anteil Speicher	0 %	3 %	15 %	15 %	13 %
	- Anteil restlicher Strombedarf	99 %	63 %	47 %	48 %	55 %
Energieumwandlung	Leistung Photovoltaikanlagen	2,2 GW	2 GW	11,3 GW	9 GW	27,9 GW
	Leistung Wind Onshore	2,3 GW	5 GW	13,1 GW	11 GW	2,5 GW
	Leistung Batterie	-	0,9 GW	2,1 GW	1,8 GW	5,8 GW
	Elektrische Leistung Kraftwerkspark	3 GW	10,6 GW	9,8 GW	7,7 GW	9,1 GW
	Haushalte und GHD	Wärmebedarf (TWh) + Verbrauchsreduktion	62,4	41,5 (34 %)	33,4 (47 %)	27 (57 %)
Wärmetechnologien		Gas, Öl, Biomasse	Hochtemperaturwärmepumpen (Syn. Gas, Wärmepumpen, Biomasse) Biomasse			
Industrie	Technologien/Brennstoffe					
	- Niedertemperaturbereich	Gas, Biomasse, Fernwärme	Gas	Hochtemperaturwärmepumpen		
	- Mitteltemperaturbereich	Gas, Kohle, Fernwärme, Biomasse	Fernwärme (Biomasse, Abfall, Gas, Synthetisches Gas)			
	- Hochtemperaturbereich	Gas, Öl, Kohle	Gas	Wasserstoff		
Verkehr	Reduktion Endenergiebedarf	-	59 %	64 %	70 %	44 %
	Anteil BEV	<1 %	100 %	90 %	72 %	35 %
Wasserstoff	Import Wasserstoff (grün)	-	-	21 TWh	22 TWh	29 TWh
	Import Wasserstoff (blau/türkis)	-	6,6 TWh	-	-	-
	Import PtL/PtG	-	-	25 TWh	20 TWh	38 TWh
	Leistung Elektrolyseure	-	-	3,8 GW	3,2 GW	-

\*Werte für die Szenarien BAU, Referenz, Suffizienz und BANANA beziehen sich auf das Jahr 2045

\*\*Werte aus den Szenarien, die eine bestimmte Entwicklung untersuchen, werden nicht dargestellt