



# **Herkunftsnachweise für grüne Energie**

Granulare Grünstromvermarktung für eine  
marktbasierte Energiewende

Studie | April 2022

## IMPRESSUM

Herkunftsnachweise für grüne Energie – Granulare Grünstromvermarktung für eine marktbasierende Energiewende

### Herausgegeben von:

EPICO Klimainnovation  
(Energy and Climate Policy and Innovation Council e.V.)  
Friedrichstraße 79  
10117 Berlin

Konrad-Adenauer-Stiftung e. V.  
Klingelhöferstr. 23  
10785 Berlin

### Erstellt durch:

Aurora Energy Research GmbH  
Kottbusser Damm 25-26  
10967 Berlin

Autoren: Dr. Casimir Lorenz, Henrike Sommer, Simon Koch

### Steuerungskreis:

Dr. Bernd Weber, Robin Reh, Sabina Wölkner, Kevin Oswald, Dr. Casimir Lorenz, Henrike Sommer, Simon Koch

### Zitieren als:

EPICO & Aurora Energy Research (2022). „Herkunftsnachweise für grüne Energie – Granulare Grünstromvermarktung für eine marktbasierende Energiewende“, Berlin.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

## KURZFASSUNG

Ein kluges Strommarktdesign ist von entscheidender Bedeutung für den Ausbau erneuerbarer Energien, der ein wesentlicher Baustein für die Realisierung der ambitionierten deutschen Klimaziele ist. Herkunftsnachweise als marktbasierendes Instrument erleichtern den Weg zur Klimaneutralität, indem sie den Ausbau erneuerbarer Energien fördern. Für eine marktbasierende Energiewende und das Erreichen der Klimaziele ist ein effizientes Marktdesign für Herkunftsnachweise daher ein wichtiger Baustein. Die vorliegende Studie analysiert, wie eine granulare Ausgestaltung von Herkunftsnachweisen die Integration erneuerbarer Energien in den Strommarkt unterstützt, indem sie die physikalische Realität besser abbildet und so ein Preissignal für Flexibilität bereitstellt.

Ein Herkunftsnachweis ist ein elektronisches Zertifikat über die Produktion einer Megawattstunde erneuerbaren Stroms. Europaweit ist seit 2016 ein Anstieg der Nachfrage nach Herkunftsnachweisen zu beobachten. Die Gründe für den generellen Anstieg der Nachfrage nach Herkunftsnachweisen liegen zum einen in der stetigen Steigerung der Stromnachfrage und zum anderen im regulatorischen Rahmen, der im Zuge der Energiewende einen stärkeren Fokus auf europäische Herkunftsnachweise legt. Darüber hinaus steigt das Bewusstsein der Endverbraucher und Unternehmen, sich aktiv für Strom aus erneuerbaren Energien zu entscheiden. Dieser erhöhten Nachfrage steht ein erhöhtes Angebot an Herkunftsnachweisen durch den Ausbau erneuerbarer Energien gegenüber. Die zukünftige Entwicklung des Marktes für Herkunftsnachweise hängt von verschiedenen Faktoren ab. Ein Ausstieg Norwegens aus dem europäischen Handelssystem würde zu weniger Zertifikaten und damit höheren Preisen führen. Andererseits würde das Ende des Doppelvermarktungsverbots, wie momentan im Rahmen der Reform der europäischen Erneuerbaren-Richtlinie diskutiert, zu einer größeren Menge an deutschen Herkunftsnachweisen führen und somit nicht nur preissenkend wirken, sondern Deutschland potenziell vom Importeur zum Exporteur von Herkunftsnachweisen machen. Auch der Hochlauf des Wasserstoffmarktes könnte durch eine höhere Nachfrage nach Herkunftsnachweisen zu höheren Preisen führen, da diese geeignet sind, um die Produktion von grünem Wasserstoff nachzuweisen.

In Deutschland haben Herkunftsnachweise eine jährliche Auflösung. Diese grobe zeitliche Nachweisführung ignoriert die stark fluktuierende Stromerzeugung von erneuerbaren Energien und unterstellt eine fiktive Welt, in der Grünstrom unterjährig kostenlos und unbegrenzt zur Verfügung steht. Dies trägt zum Vorwurf des *Greenwashings* bei, der annimmt, dass Unternehmen Graustrom als Grünstrom verkaufen. Durch die jährliche Abrechnung entstehen vielfältige Fehlanreize. Verbraucher können ihre Nachfrage nach grünem Strom mit jeder erneuerbaren Erzeugungstechnologie abdecken, unabhängig vom Einspeiseprofil. Lediglich die jährliche Gesamterzeugung muss dem jährlichen Verbrauch entsprechen, unabhängig vom Zeitpunkt der Erzeugung. Der gesamte jährliche Verbrauch kann somit beispielsweise durch Herkunftsnachweise aus Solarenergie gedeckt werden, auch wenn diese Anlagen nachts nicht ins Netz einspeisen. Das Preissignal von Herkunftsnachweisen ignoriert somit die physikalische Realität und führt dazu, dass eine Verzerrung der Investition stattfindet: Es wird tendenziell in die individuell günstigste nachhaltige Technologie investiert, ohne dass die Systemintegration eine Rolle spielt.

Um eine bessere Vorstellung davon zu bekommen, wie die verschiedenen erneuerbaren Technologien bestimmte Nachfrageverläufe erfüllen können, untersuchen wir in einem ersten Schritt den Abdeckungsgrad von Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See. In einem zweiten Schritt definieren wir den Abdeckungsgrad einer Erneuerbaren-Technologie als den Anteil, den diese Technologie zur Erfüllung von exemplarischen Nachfrageprofilen beitragen kann. Gegeben, dass der

Abdeckungsgrad für alle drei Technologien unter 100 % liegt, müssen Schwankungen durch zusätzliche Speicher oder Flexibilitätsmechanismen ausgeglichen werden: Wird in einer Stunde mehr produziert, als zur Deckung der Nachfrage notwendig ist, kann diese Überproduktion nicht direkt genutzt werden, um in Stunden mit weniger Erneuerbaren-Produktion eine höhere Abdeckung zu erreichen. In einem zweiten Schritt vergleichen wir diesen Abdeckungsgrad mit den marktbasieren Beschaffungskosten durch langfristige Stromabnahmeverträge (sog. Power Purchase Agreements, PPAs). Anhand dieses Vergleichs soll anschließend ermittelt werden, zu welchen Kosten welche Technologie welchen Anteil des Verbrauchs stündlich abdecken kann. Photovoltaik weist die geringsten und Wind auf See die höchsten Preise für PPAs auf. Photovoltaik hat allerdings den geringsten stündlichen Abdeckungsgrad. Durch die Gewichtung des PPA-Preises mit dem Abdeckungsgrad wird deutlich, dass Photovoltaik in Bezug auf den Abdeckungsgrad die teuersten Beschaffungskosten aufweist. Dies zeigt klar die Fehlanreize auf, die jährliche Herkunftsnachweise für Verbraucher mit sich bringen: In einer jährlichen Abrechnung von Herkunftsnachweisen erscheint Photovoltaik als die günstigste Technologie zur Deckung des Verbrauchs durch Erneuerbare, während Photovoltaik bei Berücksichtigung des stündlichen Abdeckungsgrads wesentlich teurer als Wind an Land und Wind auf See ist.

Um Erneuerbare besser ins Netz zu integrieren, sind Flexibilitätsoptionen unabdingbar. Das Ziel ist es, Verbrauch und Erneuerbaren-Produktion näher zusammenzubringen. Hierfür braucht es jedoch die richtigen Anreize. Stündliche Herkunftsnachweise liefern wichtige Preissignale, die mehr Investitionen in Flexibilität wie Batterien und andere Speichertechnologien anreizen können. Wenn viele Erneuerbare ins Netz einspeisen, sind Herkunftsnachweise und damit grüner Strom günstiger. Es lohnt sich folglich, Flexibilitätstechnologien in Stunden mit geringer Erneuerbaren-Erzeugung einzusetzen. Es werden ebenfalls Anreize für Nachfrageflexibilität gesetzt: Durch geringere Preise ist es effizient, die Nachfrage in Stunden mit hoher Erneuerbaren-Erzeugung zu verschieben. Stunden, in denen der Anteil erneuerbarer Energien besonders niedrig ist, sind attraktiv für Flexibilität, da der Preis für Herkunftsnachweise erwartungsgemäß höher sein wird. Obgleich der Anteil erneuerbarer Energien insgesamt steigt und der Anteil von Stunden mit hohem Erneuerbaren-Anteil ebenfalls zunimmt, ergibt unsere Analyse, dass auch 2030 und 2035 noch ein großer Anteil an sogenannten kritischen Stunden verbleibt, in denen der Anteil erneuerbarer Energien an der Erzeugung gering ist. Zudem können wir davon ausgehen, dass nicht nur der Anteil Erneuerbarer wächst, sondern auch die Nachfrage nach stundenscharfen Grünstromtarifen. Mehr Angebot steht in diesem Fall also auch eine gesteigerte Nachfrage gegenüber. Aus diesen Schwankungen des Erneuerbaren-Anteils und der Nachfrage ergeben sich Flexibilitätsanreize mit unterschiedlicher Granularität. Einerseits wird kurzfristige Flexibilität angereizt, die sich aus stündlichen Preisunterschieden innerhalb eines Tages ergibt. Andererseits schwankt der Erneuerbaren-Anteil auch wöchentlich und saisonal, was sich in unterschiedlichen Preisen von Herkunftsnachweisen niederschlägt. Diese Preisunterschiede setzen Anreize für mittelfristige und langfristige Flexibilität.

Basierend auf der Analyse empfehlen wir die Einführung von stündlichen Herkunftsnachweisen, idealerweise auf europäischer Ebene, um Herkunftsnachweise stärker mit dem physikalischen Stromverbrauch zu synchronisieren. Weitere positive Effekte sind ein aussagekräftiges Preissignal und mehr Transparenz für den Endverbraucher, die den oft genannten Vorwurf des *Greenwashings* entkräftigt. Bei der Entwicklung eines Marktdesigns muss die Anreizwirkung verschiedener Parametrisierungen untersucht werden.

# INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung .....	i
1 Einleitung.....	1
2 Übersicht zum Markt für Herkunftsnachweise .....	3
2.1 Herkunftsnachweise als Baustein des Energiemarkts.....	3
2.1.1 Definition und Zweck.....	3
2.1.2 Marktdesign und Institutionen.....	3
2.2 Regulierung von Herkunftsnachweisen.....	4
2.2.1 Der regulatorische Rahmen für Herkunftsnachweise in Deutschland und Europa .....	4
2.2.2 Zukünftige regulatorische Entwicklungen .....	5
2.3 Marktsituation für Herkunftsnachweise .....	5
2.3.1 Herkunftsnachweise in Zahlen .....	5
2.3.2 Zukünftige Marktentwicklung .....	8
3 Probleme des jährlichen Systems und ANreizwirkung eines stündlichen Systems für Herkunftsnachweise.....	11
3.1 Die Grenzen des geltenden Systems für Herkunftsnachweise.....	11
3.2 Die optimale Granularität für Herkunftsnachweise .....	12
3.3 Ein stündliches Herkunftsnachweissystem zur besseren Systemintegration erneuerbarer Energien.....	13
3.4 Pilotprojekte und Initiativen im Bereich granularer Herkunftsnachweise.....	14
4 Abdeckungsgrad und Beschaffungskosten verschiedener Erneuerbarer Technologien.....	16
4.1 Erzeugungs- und Nachfrageprofile im jährlichen und täglichen Vergleich .....	16
4.2 Vergleich zwischen Abdeckungsgrad und marktbasieren Beschaffungskosten .....	21

5	Granulare Herkunftsnachweise als Flexibilitätsanreiz .....	24
5.1	Entwicklung des stündlichen Anteils Erneuerbarer im Jahresverlauf .....	24
5.2	Das Preissignal als Flexibilitätsanreiz.....	28
6	Handlungsempfehlungen für ein granulares Marktdesign von Herkunftsnachweisen.....	31
7	Literaturverzeichnis .....	33

# 1 EINLEITUNG

Als Antwort auf die Klimakrise hat Deutschland ambitionierte Klimaschutzziele festgelegt: Bis 2030 sollen Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um 65 % gesenkt werden; bis 2040 soll eine Reduktion von 88 % erreicht werden. 2045 ist das Zieljahr für Treibhausgasneutralität (BMW i 2021). Ein wichtiger Baustein auf dem Weg zum Erreichen der Ziele ist der Ausbau erneuerbarer Energien. Ihr Anteil an der Stromproduktion soll bis 2030 auf 65 % steigen (Bundesregierung 2021), laut Koalitionsvertrag sogar auf 80 % (FDP, Bündnis 90/Die Grünen, SPD 2021).

Für den erfolgreichen Ausbau erneuerbarer Energien sind nicht nur Investitionsanreize, sondern auch Anreize zur Systemintegration Erneuerbarer eine Grundvoraussetzung. Hier ist ein kluges Marktdesign von entscheidender Bedeutung. EPICO und die Konrad-Adenauer-Stiftung haben im *Policy Accelerator for Climate Innovation* zur Erarbeitung eines solchen Marktdesigns innovationsorientierte Lösungsvorschläge entwickelt (EPICO 2021a). Sie identifizierten als Ergebnis unter anderem eine digitale, grenzüberschreitende und zeitlich granulare Ausgestaltung der Grünstromvermarktung als wichtigen Konzeptbaustein für ein innovatives Marktdesign. Ein solches würde helfen, die Investitionen im Bereich der Erneuerbaren Energien sowie der Flexibilitätstechnologien zu stärken. Durch hohe Volatilität der erneuerbaren Technologien muss die Einspeisung erneuerbarer Energien durch eben solche flexiblen Technologien ergänzt werden. Diese sind vor allem dadurch gekennzeichnet, dass sie ihr Einspeise- oder Verbrauchsverhalten schnell ändern können. Dies sind beispielhaft Speicher in Form von Batterien. Auch auf Verbraucherseite kann durch Nachfrageverschiebungen eine Flexibilität entstehen. Diese Investitionen unterstützen die Dekarbonisierung des Stromsektors sowie der weiteren Sektoren durch Elektrifizierung beziehungsweise Umstellung auf grünen Wasserstoff. Herkunftsnachweise sind ein wichtiges Instrument der Grünstromvermarktung, da sie es Endverbrauchern ermöglichen, den Anteil Erneuerbarer an ihrem Verbrauch zu belegen.

Zurzeit sind Herkunftsnachweise jährlich ausgestaltet. Dies steht Innovationsanreizen und einer Refinanzierung von Erneuerbaren am Markt im Weg, da die physikalische Realität nicht abgebildet wird. Eine zu grobe zeitliche Nachweisführung ignoriert die stark fluktuierende Stromerzeugung von erneuerbaren Energien und unterstellt eine fiktive Welt, in der Grünstrom unterjährig kostenlos und unbegrenzt gespeichert werden kann.

Die vorliegende Studie detailliert den im *Policy Accelerator* entwickelten Lösungsvorschlag granularer Herkunftsnachweise aus, um herauszuarbeiten, wie granulare Herkunftsnachweise die Systemintegration<sup>1</sup> Erneuerbarer durch ein Preissignal für mehr Flexibilität unterstützen können. Dafür erläutern wir zunächst das Marktdesign und den regulatorischen Rahmen des derzeit gültigen Systems für Herkunftsnachweise. In einem zweiten Schritt leiten wir ab, welche Fehlanreize durch eine jährliche Abrechnung von Herkunftsnachweisen entstehen. Als potenzielle Lösung arbeiten wir stündliche Herkunftsnachweise und ihre Anreizwirkung heraus. Um die Wirkung von stündlichen Herkunftsnachweisen zu verstehen, untersuchen wir, wie verschiedene erneuerbare Technologien in der Lage sind, die stündliche Nachfrage verschiedener Verbraucher zu welchen Kosten zu decken. Ein Zwischenergebnis ist, dass eine Flexibilitätslücke verbleibt. Im letzten Kapitel analysieren wir, wie

---

<sup>1</sup> Um die Lieferung von erneuerbarem Strom sicherzustellen, muss neben dem Ausbau erneuerbarer Kraftwerke auch die Integration in das Stromnetz sichergestellt werden.

stündliche Herkunftsnachweise durch ihr Preissignal Flexibilitätsanreize setzen und somit zu einer besseren Systemintegration erneuerbarer Energien beitragen.

## 2 ÜBERSICHT ZUM MARKT FÜR HERKUNFTSNACHWEISE

### 2.1 Herkunftsnachweise als Baustein des Energiemarkts

#### 2.1.1 Definition und Zweck

Ein Herkunftsnachweis ist ein elektronisches Zertifikat über die Produktion einer Megawattstunde erneuerbaren Stroms. Der Nachweis ermöglicht es Endverbrauchern, zu belegen, welcher Anteil ihres Stromverbrauches aus erneuerbaren Energieträgern (EE) stammt. Erzeuger können sich für die von ihnen produzierte und ins Netz eingespeiste Menge erneuerbaren Stroms Herkunftsausweise ausstellen lassen. Dies ermöglicht es EE-Erzeugern, nicht nur mit der erzeugten Strommenge am Strommarkt, sondern auch mit der grünen Eigenschaft des Stroms Erlöse zu erwirtschaften. Herkunftsnachweise enthalten Angaben zur Erzeugungstechnologie und -ort und sind gemäß der Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen für 12 Monate nach Stromproduktion ausstellbar, handelbar und entwertbar. Herkunftsnachweise unterliegen einem europäischen System und sind grenzüberschreitend handelbar.

In Europa wurden Herkunftsnachweise als vom physikalischen Strommarkt getrennter Mechanismus mit der ersten Erneuerbaren-Energien-Richtlinie im Jahr 2001 eingeführt. Ziel war es, für Endverbraucher überprüfbar darzustellen, welcher Anteil ihres Stromverbrauches durch erneuerbare Quellen produziert wurde. Herkunftsnachweise stellen eine zusätzliche Einnahmequelle für Erneuerbare dar, sind jedoch nicht als zusätzliches Finanzierungsinstrument für Erneuerbare eingeführt worden.

#### 2.1.2 Marktdesign und Institutionen

Bei Erzeugung einer Megawattstunde erneuerbaren Stroms kann unter bestimmten Voraussetzungen, die im weiteren Verlauf erläutert werden, ein Herkunftsnachweis ausgestellt werden. Nationale Ämter oder Institute registrieren diese in einem dafür vorgesehenen Register.

In Deutschland ist dafür das Bundesumweltamt (UBA) zuständig, welches das Herkunftsnachweisregister (HKNR) betreibt. Das UBA ist seit 2016 Mitglied des europäischen Verbandes der Zertifikatsausgeber AIB (*Association of Issuing Bodies*). Aufgrund dieser Mitgliedschaft können somit in Deutschland ausgestellte Herkunftsnachweise auch europaweit gehandelt werden. Das AIB hat das *European Energy Certificate System* (EECS) entwickelt. Es handelt sich dabei um ein System, das Herkunftsnachweise europaweit standardisiert und den Handel mit ihnen ermöglicht. Das Ziel ist eine hohe Objektivität und dargelegte Transparenz grün erzeugten Stroms.

Wenn ein in Deutschland ausgestellter Herkunftsnachweis im HKNR registriert wird, wird dies aufgrund der Mitgliedschaft im AIB direkt im EECS erfasst. Energieversorgungsunternehmen können nun Herkunftsnachweise unabhängig vom erzeugten Strom kaufen und somit die grüne Eigenschaft des Stroms und abhängig von der physikalischen Energie vermarkten. Beim Kauf wird der gekaufte Herkunftsnachweis entwertet und kann nicht weiter genutzt werden. So wird sichergestellt, dass einerseits jede Megawattstunde, die in Kombination mit einem Herkunftsnachweis bezahlt wird, auch produziert wurde, und andererseits, dass jeder Herkunftsnachweis nur einmal geliefert und entwertet wird.

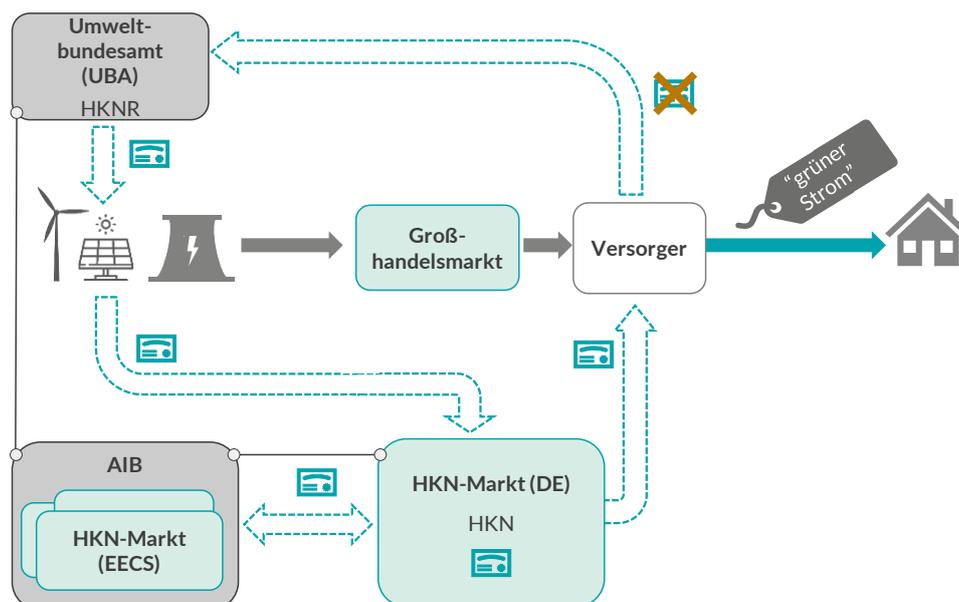


Abbildung 1: Der Handel mit Herkunftsnachweisen in Deutschland (eigene Darstellung)

Der Preis von Herkunftsnachweisen wird durch Angebot und Nachfrage bestimmt. Während in einigen Ländern zentrale Auktionen für Herkunftsnachweise, meist diejenigen aus staatlich geförderten Anlagen, ein transparentes Preissignal bereitstellen, erfolgt der Handel in Deutschland „over-the-counter“, also bilateral und nicht börsenbasiert. Die europäische Strombörse EPEX SPOT plant jedoch im Jahr 2022 die Einführung monatlicher, multilateraler Auktionen für Herkunftsnachweise in ausgewählten Ländern, die Teil des EECS sind. Käufer und Verkäufer werden dadurch in der Lage sein, sowohl spezifische als auch allgemeine Herkunftsnachweise zu ersteigern, was die Marktliquidität steigern soll. Es werden mehrere Spezifitätsebenen in drei Dimensionen zur Verfügung stehen: Land, Technologie und Subventionsregelung. Die Indizes werden nach jeder Auktion veröffentlicht (EPEX SPOT 2021).

## 2.2 Regulierung von Herkunftsnachweisen

### 2.2.1 Der regulatorische Rahmen für Herkunftsnachweise in Deutschland und Europa

Herkunftsnachweise sind sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene reguliert.

Das europäische Recht schreibt vor, dass Herkunftsnachweise verwendet werden müssen, um den Anteil der erneuerbaren Energien an den Gesamtlieferungen eines Lieferanten an seine Kunden nachzuweisen. Den aktuellen regulatorischen Rahmen für Herkunftsnachweise in Europa bestimmt die Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Europäische Kommission 2018). Artikel 19 legt fest, dass ein Herkunftsnachweis standardmäßig für eine Megawattstunde gilt und von den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union auf Anfrage eines Produzenten von Energie aus erneuerbaren Quellen erstellt wird. Herkunftsnachweise haben eine Gültigkeit von 12 Monaten ab Produktion der Energieeinheit und können in diesem Zeitrahmen erstellt, gehandelt und entwertet werden. Des Weiteren definiert die Richtlinie die Mindestangaben des Herkunftsnachweises. Es müssen unter anderem Angaben zur Energiequelle, zum Sektor und zur

genauen Anlage gemacht werden. Die Herkunftsnachweise aus anderen Mitgliedsstaaten der EU sind anzuerkennen.

Die europäischen Vorgaben zu Herkunftsnachweisen sind in Deutschland im Erneuerbaren-Energien-Gesetz umgesetzt (EEG 2021). Artikel 79 regelt allgemeine Vorgaben zur Aufgabe des Umweltbundesamts und zur Ausstellung, Übertragung und Entwertung von Herkunftsnachweisen. Weitere Details sind in der Durchführungsverordnung über Herkunftsnachweise geregelt. Deutschland macht von der in Artikel 19 der Erneuerbaren-Richtlinie beschriebenen Möglichkeit Gebrauch, einem Produzenten, der finanzielle Förderung aus einer Förderregelung erhält, keinen Nachweis auszustellen. Dies ist in Artikel 80 des EEG 2021 als sogenanntes Doppelvermarktungsverbot festgehalten. Diese Regelung basiert auf der Logik, dass die grüne Eigenschaft des Stroms bereits durch die EEG-Umlage von den Endverbrauchern bezahlt wurde und somit eine doppelte Verwertung durch zusätzliche Herkunftsnachweise ausgeschlossen werden soll. Dies führt zu tendenziell höheren Preisen in Ausschreibungen zur Förderung erneuerbarer Energien, da Einkommen aus Herkunftsnachweisen nicht ins Gebot eingepreist werden kann. Das deutsche Doppelvermarktungsgebot kann als Sonderweg betrachtet werden, da ein Großteil der anderen Mitgliedsstaaten Herkunftsnachweise für geförderte Anlagen ausgibt; entweder den Anlagenbetreibern direkt oder dem Markt durch zentrale Auktionen.

## **2.2.2 Zukünftige regulatorische Entwicklungen**

Herkunftsnachweise gewinnen zunehmend an Bedeutung in der energiewirtschaftlichen Diskussion. Im Rahmen des Europäischen Green Deal wird die Erneuerbaren-Richtlinie als Teil des Fit-for-55-Pakets reformiert (Europäische Kommission 2021). Hierbei wird auch Artikel 19 zu Herkunftsnachweisen grundlegend überarbeitet. Die Möglichkeit, finanziell geförderten Erneuerbaren keine Herkunftsnachweise auszustellen, soll künftig entfallen. Dies würde das Ende des Doppelvermarktungsverbots in Deutschland bedeuten und in einer Zunahme von Herkunftsnachweisen aus Deutschland resultieren. Dies hätte einen preissenkenden Effekt auf Herkunftsnachweise, da die absolute Menge der Zertifikate zunehmen würde. Der legislative Reformprozess ist bereits weit fortgeschritten. Nach Verabschiedung der Gesetzesänderungen erfolgt typischerweise eine zweijährige Implementationsfrist. Ein Ende des Doppelvermarktungsverbots würde also potenziell ab 2024/2025 erfolgen.

Des Weiteren erwähnt der Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung Herkunftsnachweise. Der europäische Handel mit Herkunftsnachweisen soll im Sinne des Klimaschutzes gestärkt werden (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021). Konkrete Umsetzungspläne zu dieser Maßnahme liegen noch nicht vor.

## **2.3 Marktsituation für Herkunftsnachweise**

### **2.3.1 Herkunftsnachweise in Zahlen**

Im Folgenden betrachten wir die Marktsituation von Herkunftsnachweisen näher. Dabei liegt der Fokus auf „Angebot“ und „Nachfrage“. Das „Angebot“ entspricht der Menge an Herkunftsnachweisen, die ausgegeben wird, während die „Nachfrage“ der Menge an Herkunftsnachweisen entspricht, die entwertet wurden.

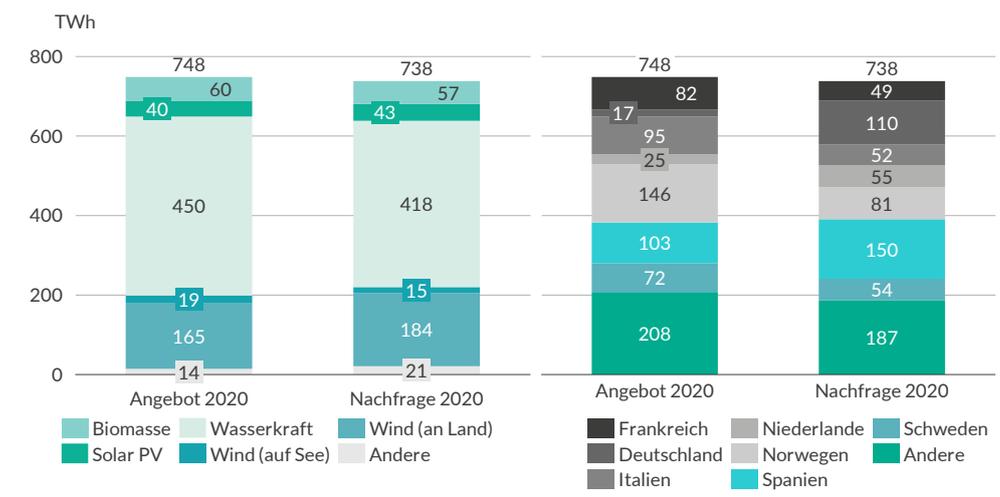


Abbildung 2: Europäisches Angebot und Nachfrage nach Herkunftsnachweisen im Jahr 2020 nach Technologie und Land (Aurora Energy Research 2021a)

In Abbildung 2 sind die jeweiligen Angebots- und Nachfragemengen von Herkunftsnachweisen nach Technologie und nach Land beispielhaft für das Jahr 2020 in Europa abgebildet. Es ist zu sehen, dass im Jahr 2020 das Angebot von Herkunftsnachweisen in Europa bei insgesamt 748 Terrawattstunden (TWh) lag, von denen mehr als die Hälfte aus Wasserkraft stammten. Mit einem Anteil von etwa einem Fünftel hatte Wind an Land die zweitmeisten Herkunftsnachweise registriert. Neben dem Angebot ist ebenfalls die Nachfrage zu sehen. Sie besagt, dass im Jahr 2020 738 TWh Herkunftsnachweise entwertet worden sind. Die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage lässt sich damit erklären, dass Herkunftsnachweise nicht im selben Jahr entwertet werden müssen, in dem sie auch ausgegeben werden. Vielmehr sind Herkunftsnachweise 12 Monate gültig, sodass es zu einer Überlappung von Angebot und Nachfrage des vorigen sowie folgenden Jahres kommen kann.

Im europäischen Vergleich hatte Norwegen mit ca. 20 % den höchsten Marktanteil am Angebot von Herkunftsnachweisen. Dies liegt vor allem daran, dass Norwegen zu etwa 95 % aus Wasserkraft Energie gewann und somit einen sehr hohen Anteil erneuerbarer Energien im System hatte. Dies resultiert in einer hohen Anzahl ausgegebener Herkunftsnachweise. In Deutschland hingegen führen das Doppelvermarktungsverbot, das eine Ausgabe von Herkunftsnachweisen für geförderte EEG-Anlagen verbietet, und ein mit 50,5 % geringerer Anteil Erneuerbarer an der Stromproduktion zu einem wesentlich geringeren Marktanteil am Angebot von Herkunftsnachweisen von 2 %.

Europaweit ist seit 2016 ein Anstieg der Nachfrage zu beobachten. Aufgrund der Covid-19-Pandemie war der prozentuale Anstieg zwischen 2019 und 2020 allerdings signifikant kleiner als zuvor, da in dieser Zeit die Stromnachfrage zurückging. Die Gründe für den generellen Anstieg der Nachfrage nach Herkunftsnachweisen liegen zum einen in der stetigen Steigerung der Stromnachfrage und zum anderen im regulatorischen Rahmen, der im Zuge der Energiewende einen stärkeren Fokus auf europäische Herkunftsnachweise legt. Darüber hinaus steigt das Bewusstsein der Endverbraucher und Unternehmen, sich aktiv für Strom aus erneuerbaren Energien zu entscheiden.

Die Nachfrage- und Angebotssteigerung lässt sich auch in Deutschland bemerken: Zwischen 2016 und 2020 hat die Nachfrage nach Herkunftsnachweisen um 31 % zugenommen. Das Angebot hingegen konnte nur einen Anstieg von ca. 16 % vermerken. In Abbildung 3 ist das Angebot und die Nachfrage Deutschlands im Jahr 2020 zu sehen. Mit 110 TWh hat Deutschland europaweit die zweithöchste

Nachfrage (Platz 1: Spanien mit 150 TWh), aber lediglich ein eigenes Angebot von 17 TWh. Daraus folgt, dass 84 % der Nachfrage über Importe gedeckt werden müssen.

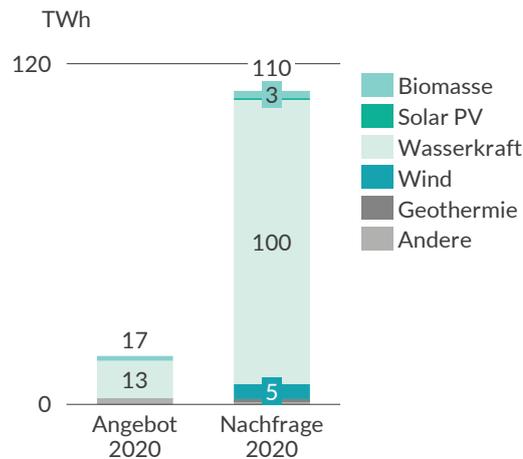


Abbildung 3: Angebot und Nachfrage von Herkunftsnachweisen im Jahr 2020 in Deutschland nach Technologie (Aurora Energy Research 2021a)

Zusätzlich zur Entwicklung von Angebot und Nachfrage ist auch die Preisentwicklung von Herkunftsnachweisen wichtig für die Marktanalyse. Herkunftsnachweise werden bilateral gehandelt. Aus diesem Grund gibt es für sie keine öffentlichen Referenzpreise, was die Transparenz der historischen Preisentwicklung einschränkt. Obwohl keine exakten Preise erfassbar sind, lassen sich dennoch Preisbereiche feststellen. Im Jahr 2020 lagen die Preise für Herkunftsnachweise in Deutschland zwischen 0,1 und 0,4 €/Megawattstunde (MWh) (Hamburg Institut 2021). Aktuelle Berichte zeigen auf, dass es seit Mitte April 2021 einen Preisanstieg gab, sodass der Preis bei bis zu 0,5 €/MWh lag. Historische Daten zeigen allerdings, dass Herkunftsnachweispreise in den Vorjahren höher lagen. 2018 lag der Preis in Deutschland beispielsweise bei bis zu 1,73 €/MWh (Umweltbundesamt 2019). Diese Größenordnung wurde auch 2019 erreicht. Die Preise entstehen aus Angebot und Nachfrage und reagieren somit auf Änderungen in der Verfügbarkeit von Herkunftsnachweisen. Die Jahre 2018 und 2019 waren zum Beispiel sehr regenarme Jahre in den nordischen Ländern, was zu geringeren Speicherständen für Wasserkraft führte. Da der Großteil der Energie aus Wasserkraft gewonnen wird, gab es durch den fehlenden Niederschlag weniger nordische Herkunftsnachweise aus Wasserkraft. Die Preise für Herkunftsnachweise stiegen folglich.

Der durch die Covid-19-Pandemie verursachte Preissturz im Jahr 2020 lässt sich unter anderem durch eine geringe Stromnachfrage und damit auch eine geringere Nachfrage nach Herkunftsnachweisen erklären.

Insgesamt ist es wichtig zu verstehen, welche Bedeutung ein zusätzliches Preissignal durch Herkunftsnachweise im Vergleich zum Preissignal aus dem Großhandelsmarkt hat. Die erwähnten Preise sind im Vergleich zum durchschnittlichen Großhandelspreis für Strom in Deutschland im Jahr 2020, der bei 30,47 €/MWh lag (ENTSO-E 2021), sehr gering und machen nur einen Anteil von etwa 0,3 – 1,3 % aus. Das bedeutet, dass derzeit das Preissignal von Herkunftsnachweisen schwächer ist als das Preissignal des Großhandelsmarkts und somit auch einen geringeren Einfluss auf Investitionsentscheidungen hat.

### 2.3.2 Zukünftige Marktentwicklung

Die zukünftige Marktentwicklung ist geprägt von regulatorischer Unsicherheit. Dementsprechend ist die Preisentwicklung von Herkunftsnachweisen nicht eindeutig vorhersagbar: Es liegen sowohl preiserhöhende als auch preissenkende Marktentwicklungen vor.

Zum Erreichen der Klimaziele ist ein massiver Ausbau erneuerbarer Energien notwendig. Dieser soll laut Koalitionsvertrag der „Ampel“-Koalition zunehmend marktbasierend und weniger durch staatliche Mechanismen erfolgen. Das Ende der Erneuerbaren-Förderung ist mit der Vollendung des Kohleausstiegs vorgesehen. Der Koalitionsvertrag sieht vor, den Übergang zum förderfreien Zubau durch eine Stärkung von marktbasierenden Instrumenten wie langfristigen Stromverträgen (PPAs) zu erleichtern. Um notwendige Investitionen in Erneuerbare anzureizen, müssen Investoren ausreichende Einnahmen generieren können. Neben Großhandelsmarkt und Systemdienstleistungen können auch Herkunftsnachweise dafür eine Rolle spielen.

#### *Entwicklung der Angebotsseite*

Die höhere Produktion aus erneuerbaren Energien wird zu einer Zunahme des Angebots an Herkunftsnachweisen sowohl in Deutschland als auch in Europa führen. Ein höheres Angebot hat einen preissenkenden Effekt auf den Herkunftsnachweispreis. Nach unseren Berechnungen wird das Angebot um ca. 5 % pro Jahr steigen (Aurora Energy Research 2021a). 2030 wird somit europaweit ein Angebot von ca. 1060 TWh erreicht. Deutschland steigert dabei sein Angebot von 23 TWh 2021 auf 61 TWh im Jahr 2030. Diese Berechnung berücksichtigt noch nicht die neuen Erneuerbaren-Ausbauziele des Koalitionsvertrags sowie das potenzielle Ende des Doppelvermarktungsverbots mit Blick auf die zu erwartende Umsetzung der EU-Erneuerbaren-Richtlinie. Aus diesen beiden Entwicklungen könnte eine massive Steigung des Angebots an deutschen Herkunftsnachweisen resultieren. Hinsichtlich der Technologien hinter deutschen Herkunftsnachweisen erwarten wir, dass die absolute Menge an Herkunftsnachweisen aus Wasserkraft konstant bleibt. Aufgrund des Doppelvermarktungsverbots können Herkunftsnachweise nur für marktbasierend ausgebaute Anlagen ausgestellt werden. Durch die Nullgebote bei aktuellen Ausschreibungen von Wind auf See sowie durch das Auslaufen der EEG-Förderung einiger Anlagen erwarten wir, dass ein hoher Anteil des marktbasierenden Ausbaus und somit der Gesamtmenge des Angebots von Herkunftsnachweisen von der Technologie Wind auf See bereitgestellt wird. Ein potenzielles Ende des Doppelvermarktungsverbots würde deutsche Herkunftsnachweise auch auf subventionierte Erneuerbare ausweiten. Somit würde der Technologiemix in diesem Fall dem vorherrschenden Erzeugungsmix der Erneuerbaren in Deutschland entsprechen.

#### *Entwicklung der Nachfrageseite*

Nicht nur die Angebotsseite, sondern auch die Nachfrageseite wird voraussichtlich wachsen. Einerseits wird sich die Stromnachfrage post COVID-19 erholen und Sektorkopplung sowie Elektrifizierung zu einer höheren Stromnachfrage in allen Sektoren führen. Andererseits gibt es eine steigende Nachfrage nach grünem Strom durch Nachhaltigkeitsziele der Industrie und mehr Nachfrage nach erneuerbarem und lokalem Strom seitens der Haushalte. Eine höhere Nachfrage hat einen preissteigernden Effekt auf den Herkunftsnachweispreis. Wir erwarten einen Nachfrageanstieg pro Jahr um 6 % und eine absolute europaweite Nachfrage von 1341 TWh (in Deutschland: 206 TWh) im Jahr 2030 (Aurora 2021a). Ob Deutschland in den kommenden Jahren Importeur bleibt, hängt stark von der Entwicklung des regulatorischen Rahmens ab. Sollten weiterhin nur Herkunftsnachweise für nicht-subventionierten Strom ausgegeben werden dürfen, könnte Deutschland nur 29 % durch nationales Angebot decken

und würde Importeur bleiben (Aurora 2021a). Sollte das Doppelvermarktungsverbot enden, werden wesentlich mehr deutsche Herkunftsnachweise ausgegeben. Für 2030 berechnen wir im Aurora Central Szenario eine Erneuerbaren-Erzeugung von 324 TWh (Aurora 2021b). Sollte für die gesamte Erzeugung Herkunftsnachweise ausgegeben werden, würde Deutschland zum Exporteur.

### *Markthochlauf von Wasserstoff*

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die zukünftige Marktentwicklung von Herkunftsnachweisen liegt in dem Markthochlauf von grünem Wasserstoff. Der Markthochlauf des europäischen Wasserstoffmarktes hat Auswirkungen auf Herkunftsnachweise, da durch sie nachgewiesen werden kann, dass der zur Erzeugung von Wasserstoff aus dem Netz entnommene Strom aus erneuerbaren Quellen stammt. Sowohl in der deutschen als auch in der europäischen Wasserstoffstrategie werden Herkunftsnachweise als wichtiges Instrument für den Markthochlauf von grünem Wasserstoff benannt (BMWi 2020, European Commission 2020). Dies wäre insbesondere der Fall, sollte das Kriterium der Zusätzlichkeit Teil des regulatorischen Rahmens für erneuerbaren Wasserstoff werden. Zusätzlichkeit bedeutet, dass für die Herstellung des Wasserstoffs ein Zubau erneuerbarer Energiequellen erfolgt, der ohne die Wasserstoffproduktion nicht erfolgt wäre. Die Idee hinter diesem Prinzip ist, dass zusätzlicher erneuerbarer Energieverbrauch auch durch zusätzliche erneuerbare Energiekapazität gedeckt werden sollte. In der Erneuerbaren-Richtlinie ist dieses Prinzip für erneuerbaren Wasserstoff festgelegt. Zugleich muss sichergestellt werden, dass die Produktion von Wasserstoff nicht dazu führt, dass Erneuerbare nicht mehr zur Stromproduktion zur Verfügung stehen. Ein weiteres wichtiges Kriterium der Erneuerbaren-Richtlinie für erneuerbaren Wasserstoff ist die zeitliche Korrelation. Dieses besagt, dass erneuerbarer Kraftstoff nicht als uneingeschränkt erneuerbar angerechnet werden kann, wenn der Wasserstoff zu einer Zeit produziert wird, in der die unter Vertrag genommene Einheit zur Erzeugung erneuerbaren Stroms keinen Strom produziert. Durch die Anforderungen, dass erneuerbarer Wasserstoff nur aus zusätzlich errichteten Erneuerbaren-Anlagen stammen darf (und möglicherweise zeitlich eng korreliert mit der Erzeugung aus diesen Anlagen erfolgen muss), wird die Produktion erneuerbaren Wasserstoffs teurer und aufwändiger. Daher stellen diese Kriterien eine regulatorische Hürde für die Entwicklung des europäischen Wasserstoffmarkts darstellt und sind in ihrer Ausgestaltung umstritten. Die Europäische Kommission erarbeitet zurzeit einen delegierten Rechtsakt, in dem das Kriterium der Zusätzlichkeit weiter ausgeführt wird. Der erste Entwurf stellt ambitionierte Forderungen an Zusätzlichkeit (Strom für Elektrolyse muss aus Anlagen stammen, die bei Inbetriebnahme der Elektrolyse maximal 12 Monate alt sind) und an die zeitliche Korrelation (Strom einer Erneuerbaren-Anlage muss in einem 15-Minuten-Zeitfenster vom Elektrolyseur verbraucht werden).

Herkunftsnachweise sind prinzipiell, jedoch nicht in ihrer jetzigen Form geeignet, die beiden Kriterien zu bedienen. Für das Kriterium der Zusätzlichkeit müssten sie die Information enthalten, dass es sich um zusätzliche Anlagen handelt, während sie für das Kriterium der zeitlichen Korrelation Herkunftsnachweise eine feinere Granularität aufweisen müssten.

### *Qualitätsmerkmale von Herkunftsnachweisen*

Der Preis von Herkunftsnachweisen wird auch durch zusätzliche Qualitätsmerkmale bestimmt, wie etwa Regionalität oder Zusätzlichkeit. Während sich Preise für Herkunftsnachweise ohne zusätzliche Qualitätsmerkmale stark an den Zertifikatspreisen für norwegische Wasserkraft orientieren, stellen spezifische Merkmale Werttreiber für Herkunftsnachweise dar. Durch eine teilweise durch regulatorische Vorgaben bedingte höhere Nachfrage nach lokalem Grünstrom werden Herkunftsnachweise in einigen Ländern bereits heute höher bewertet. Niederländische

Windzertifikate werden beispielsweise mit einem Preisaufschlag gehandelt. Hintergrund ist das Qualitätsmerkmal der Regionalität, das die höhere Nachfrage von Industrie und Haushalten nach lokalem erneuerbarem Strom bedienen kann. Schweizer Wasserkraft-Zertifikate werden ebenfalls höher gehandelt, da sie die lokale Nachfrage nach erneuerbarem Strom aus der Schweiz bedienen. Durch zunehmendes Bewusstsein für Nachhaltigkeit und lokalen Verbrauch auf Seiten der Endverbraucher ist europaweit mit einer Zunahme der Nachfrage nach regionalem Strom zu rechnen. Sollte zudem für den Wasserstoffmarkt das Kriterium der Zusätzlichkeit gelten, führt dies zu einer höheren Nachfrage nach Herkunftsnachweisen mit diesem Qualitätsmerkmal. Es ist dementsprechend zu erwarten, dass sich der Markt für Herkunftsnachweise diversifiziert und auch preislich differenziert. Qualitätsmerkmale der Herkunftsnachweise werden eine größere Rolle spielen. Dies beeinflusst auch die Anreizwirkung für Erneuerbaren-Zubau in Ländern mit vergleichsweise ungünstigen Erneuerbaren-Potential.

#### *Möglicher Rückzug Norwegens aus dem europäischen Handelssystem*

Eine weitere wichtige Marktentwicklung ist der mögliche Rückzug Norwegens aus dem gemeinsamen europäischen Handelssystem. Die norwegische Regierung hat im Oktober 2021 angekündigt, sich aus dem europäischen Handelssystem für Herkunftsnachweise zurückzuziehen, um den Strombedarf der norwegischen Industrie zu priorisieren, die durch den starken Export von Herkunftsnachweisen in Teilen nur Zugriff auf „Graustrom“ hat, also Strom ohne grüne Eigenschaft (Montel 2021). Ein Rückzug hätte erhebliche Auswirkungen. Norwegen spielt als größter Herausgeber von Herkunftsnachweisen eine wichtige Rolle im europäischen Markt. Im Jahr 2020 hat Norwegen einen Marktanteil von 20 % am europäischen Angebot, erhebliche Mengen werden vor allem nach Deutschland und in die Niederlande exportiert. Norwegen ist ebenfalls eine wichtige Handelsplattform, da die Transaktionskosten des norwegischen Systems gering sind. Aufgrund des hohen Marktanteils sind die Kosten norwegischer Herkunftsnachweise aus Wasserkraft oftmals preissetzend für den gesamten europäischen Markt. Mit dem Rückzug Norwegens würden weniger Herkunftsnachweise auf dem europäischen Markt verfügbar sein. Insgesamt könnte der Rückgang circa 146 TWh betragen (Aurora 2021a). Norwegische Herkunftsnachweise würden nicht länger als Benchmark-Preis dienen.

Der preissteigernde Effekt eines Ausstiegs Norwegens aus dem europäischen Handelssystem durch weniger verfügbare Herkunftsnachweise wird durch verschiedene Faktoren begrenzt. Einerseits wird sich die absolute Menge an Herkunftsnachweisen aus Norwegen nicht signifikant ändern, während sich die absolute Menge in anderen europäischen Ländern durch den Ausbau Erneuerbarer erhöht. Somit sinkt Norwegens Marktanteil auf etwa 12,5 % und hat langfristig einen geringeren Effekt auf den Preis als kurzfristig. Andererseits würde die Entwicklung zusätzlich durch das Ende des Doppelvermarktungsverbots überkompensiert, das zu einem großen Anstieg der deutschen Herkunftsnachweise führen würde und damit einen preissenkenden Effekt hätte. Für das Jahr 2025 sehen wir im Modellszenario Aurora Central eine Erneuerbaren-Produktion von 286 Terrawattstunden in Deutschland (Aurora 2021b). Dies könnte den Rückgang norwegischer Herkunftsnachweise überkompensieren. Entscheidend für die Preisentwicklung ist der zeitliche Ablauf: Wenn der Ausstieg Norwegens synchron zum Ende des Doppelvermarktungsverbots läuft, ist der preissteigernde Einfluss geringer und wird möglicherweise durch mehr deutsche Herkunftsnachweise überkompensiert.

### 3 PROBLEME DES JÄHRLICHEN SYSTEMS UND ANREIZWIRKUNG EINES STÜNDLICHEN SYSTEMS FÜR HERKUNFTSNACHWEISE

#### 3.1 Die Grenzen des geltenden Systems für Herkunftsnachweise

Herkunftsnachweise wurden eingeführt, als der Anteil erneuerbarer Energien im System noch gering war. Seitdem hat sich der Erneuerbaren-Anteil massiv erhöht. Erneuerbare sind abhängig vom Wetter und daher volatil, d.h. sie speisen schwankend ins Netz ein. Es gibt folglich erhebliche Abweichungen zwischen dem jährlichen und dem stündlichen Durchschnitt an erneuerbarer Erzeugung im System. In der untenstehenden Abbildung 4 haben wir dies für das Jahr 2020 beispielhaft dargestellt. Im Jahr 2020 lag der Anteil erneuerbarer Energien durchschnittlich bei 50,5 %. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass dieser Wert erheblich von der stündlichen Produktion erneuerbarer Energien abweicht: Im Juli wird ein Anteil von bis zu 85 % erreicht, während Ende November der Anteil zeitweise auf 13 % absinkt.

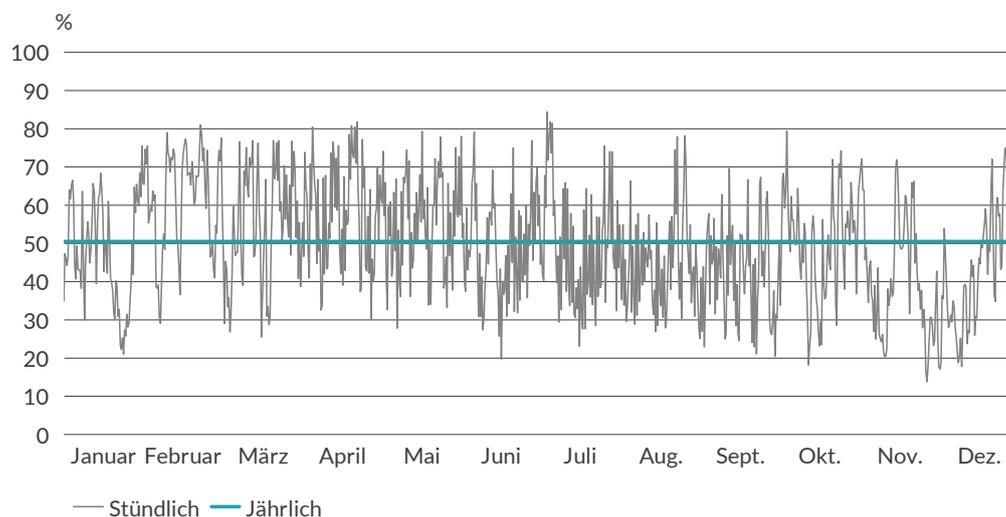


Abbildung 4: Jährlicher und stündlicher Anteil erneuerbarer Energien an gesamter Stromproduktion 2020 in Deutschland (Eigene Darstellung basierend auf ENTSO-E 2021)

Der physikalische Strommarkt hat diesen Entwicklungen Rechnung getragen, zum Beispiel durch Handel bis kurz vor Echtzeit und eine feinere Produktgranularität. Verbrauch und Erzeugung werden so in Europa auf 15-minütiger Basis ausgeglichen. Im Gegensatz dazu werden bei Herkunftsnachweisen der Verbrauch und die Erzeugung jährlich in Einklang gebracht. Dies spiegelt nicht die physikalische Realität wider: Für den Herkunftsnachweis könnte eine im Frühjahr bei Sonnenschein produzierte Megawattstunde erneuerbarer Energie mit dem Verbrauch in einer windstillen Nacht im Winter verrechnet werden. Dies entspricht der unzutreffenden Annahme, dass Erneuerbare innerhalb eines Jahres unbegrenzt und kostenlos gespeichert werden können.

Durch diese jährliche Abrechnung entstehen vielfältige Fehlanreize. Verbraucher können ihre Nachfrage nach grünem Strom mit jeder erneuerbaren Erzeugungstechnologie abdecken, unabhängig vom Einspeiseprofil. Die jährliche Gesamterzeugung muss dem jährlichen Verbrauch entsprechen, unabhängig vom Zeitpunkt der Erzeugung. Der gesamte jährliche Verbrauch kann somit beispielsweise

durch Herkunftsnachweise aus Solarenergie gedeckt werden, auch wenn diese Anlagen nachts nicht ins Netz einspeisen. Das Preissignal von Herkunftsnachweisen ignoriert somit die physikalische Realität und führt dazu, dass eine Verzerrung der Investition stattfindet: Es wird tendenziell in die individuell günstigste nachhaltige Technologie investiert, ohne dass die Systemintegration eine Rolle spielt.

Zudem sind jährliche Herkunftsnachweise wenig transparent. Das Kernziel von Herkunftsnachweisen liegt darin, dem Endverbraucher den erneuerbaren Anteil seines Stromverbrauchs aufzuzeigen. Der Informationsfluss ist im Falle von jährlichen Herkunftsnachweisen nicht granular genug: Durch die jährliche Abrechnung kann nur ein grober Durchschnittswert dargestellt werden statt einer echten Annäherung zwischen Verbrauch und Erneuerbaren-Erzeugung. In diesem Zusammenhang haben Herkunftsnachweise oftmals den Ruf, ein Mittel des Greenwashings für Unternehmen zu sein.

### 3.2 Die optimale Granularität für Herkunftsnachweise

Es ist wichtig, genauer zu definieren, was wir unter granularen Herkunftsnachweisen verstehen. Es sind verschiedene Granularitäten für Herkunftsnachweise denkbar, vom Status quo der jährlichen Abrechnung bis hin zu monatlicher, täglicher, stündlicher, viertelstündlicher oder sogar minütlicher Auflösung. Die Anpassung an die physikalische Realität verbessert sich marginal immer weniger, je feiner die Granularität: Während der Sprung von einem jährlichen Erneuerbaren-Durchschnitt zum stündlichen Durchschnitt sehr groß ist, wird er bei einer Bewegung von stündlichen zu viertelstündlichen Herkunftsnachweisen kleiner. Zweiteres ist in der Abbildung 5 erkennbar: der viertelstündliche Erneuerbaren-Anteil ist sehr nah am stündlichen Erneuerbaren-Anteil. Die maximale relative Abweichung beträgt 6,6 % im Sommer bzw. 4,5 % im Winter. Diese Tage sind beispielhaft und nicht repräsentativ, verdeutlichen jedoch die Aussage der sinkenden Sprünge. Diese saisonalen Unterschiede treten durch im Tagesverlauf unterschiedliche Einfallwinkel bei PV-Anlagen auf, die oftmals nach Süden ausgerichtet sind. Diese Veränderungen sind im Sommer ausgeprägter als im Winter und sind stärker im viertelstündlichen Profil zu erkennen.



Abbildung 5: Stündlicher und viertelstündlicher Anteil erneuerbarer Energien an gesamter Stromerzeugung an einem beispielhaften (nicht-repräsentativen) Sommer- bzw. Wintertag 2020 (Eigene Darstellung basierend auf ENTSO-E 2021)

Höhere Granularität führt aber zu höheren Transaktionskosten, u.a. durch kürzere Gültigkeit der Herkunftsnachweise und damit einem höheren Abrechnungsaufwand. Es gibt also einen Punkt, an dem eine feinere Granularität mehr Nachteile durch höhere Transaktionskosten als Vorteile durch eine

bessere Systemtransparenz mit sich bringt. Im Folgenden werden wir uns auf stündliche Herkunftsnachweise fokussieren, da eine feinere Granularität höhere Transaktionskosten mit sich bringen würde, ohne eine erhebliche Verbesserung der physikalischen Abbildung darzustellen, wie in der obenstehenden Abbildung 5 zu erkennen ist.

### **3.3 Ein stündliches Herkunftsnachweissystem zur besseren Systemintegration erneuerbarer Energien**

Mit einem höheren Erneuerbaren-Anteil wurde die Systemintegration Erneuerbarer immer herausfordernder. Zugleich tritt zunehmend ein Kannibalisierungseffekt auf: Da Erneuerbare aufgrund der Wetterabhängigkeit gleichzeitig produzieren, führt dies zu sinkenden Preisen in diesen Stunden und somit für weniger Einkommen für Erneuerbare. Um Erneuerbare besser ins Netz zu integrieren, sind Flexibilitätsoptionen unabdingbar. Das Ziel ist es, Verbrauch und Erneuerbaren-Produktion näher zusammenzubringen. Mögliche Lösungen sind hier Speicher, Nachfrageflexibilität oder eine optimierte Steuerung der Erneuerbaren-Produktion.

Hierfür braucht es jedoch die richtigen Anreize. Stündliche Herkunftsnachweise liefern wichtige Preissignale, die mehr Investitionen in Flexibilität anreizen können. Stündliche Zertifikate ermöglichen es, den stündlichen und nicht nur den jährlichen Erneuerbaren-Anteil im Netz am Verbrauch darzustellen. Somit wird die physikalische Realität der Verfügbarkeit Erneuerbarer besser abgebildet.

Granulare Herkunftsnachweise können auch den Preis im Allgemeinen steigern: Je mehr Verbraucher eine 24/7-Bereitstellung grünen Stroms nachfragen, desto höher ist die Nachfrage auch in Stunden mit geringem Erneuerbaren-Anteil. Da keine unbegrenzte Speicherbarkeit mehr angenommen wird, treibt dies die Preise nach oben. Höhere Preise tragen einerseits zu einer besseren marktbasieren Finanzierung erneuerbarer Energien bei. Andererseits liefern sie Anreize, in die richtige Erzeugungstechnologie zu investieren. Der Preis von Herkunftsnachweisen würde innerhalb des Tages schwanken und höher sein, wenn relativ zur Nachfrage weniger Erneuerbare ins Netz einspeisen, z.B. nachts. So wird ein Preissignal zur Investition in Technologien gesetzt, die in diesen Momenten hoher Preise produzieren können, beispielsweise Speicher und Windkraft. Es führt ebenfalls zu einer systemoptimierten Ausrichtung erneuerbarer Technologien, beispielsweise durch Ost-West-Ausrichtung von Photovoltaik oder Unterdimensionierung der Generatoren von Windanlagen. Dies reizt geographische und technische Vielfalt von nachhaltigen Erzeugungs- und Speichertechnologien an, da der Systemwert verschiedener Technologien besser vergleichbar wird.

Das Preissignal stündlicher Herkunftsnachweise setzt ebenfalls Anreize für Nachfrageflexibilität. Wenn viele Erneuerbare ins Netz einspeisen, sind Herkunftsnachweise und damit grüner Strom günstiger. Es lohnt sich folglich, die Nachfrage in Stunden mit hoher Erneuerbaren-Erzeugung zu verschieben.

Interessant ist das Zusammenspiel der Preissignale von Herkunftsnachweisen und dem Großhandelsmarkt. Flexible Erzeugungstechnologien richten sich nach dem Preissignal aus. Zurzeit ist das dominante Preissignal das des Großhandelsmarkts. Dieses wird nicht nur durch Erneuerbare, sondern auch durch konventionelle Erzeugung und die Nachfrage geprägt. Granulare Herkunftsnachweise würden ein zusätzliches Preissignal in den Markt geben. Dieses Preissignal würde auf der Erneuerbaren-Einspeisung beruhen: Bei hohem Erneuerbaren-Anteil ist der Preis von Herkunftsnachweisen tendenziell niedrig. Im Vergleich zu jährlichen Herkunftsnachweisen ist die Preisentwicklung bei stündlichen Herkunftsnachweisen nicht nur wesentlich volatil, es werden auch

weitaus höhere Preise erreicht. Dies führt zu einem stärkeren Signal verglichen mit der heutigen Preisgestaltung, was Investitionsanreize schafft. Somit entsteht ein Anreiz, insbesondere in Zeiten hoher Erneuerbaren-Einspeisung Strom zu verbrauchen, und in Zeiten niedriger Erneuerbaren-Einspeisung Strom ins Netz einzuspeisen. Dieses doppelte Preissignal führt nicht zwingend zum volkswirtschaftlich optimalen Ergebnis, da es die Anreize zugunsten der Erneuerbaren verzerrt. Ein Beispiel ist ein Moment, in dem sehr viel Kohle und gleichzeitig wenig Erneuerbare in das Netz einspeisen. Zu diesem Zeitpunkt kann der Großhandelspreis sehr niedrig ausfallen, was einen höheren Verbrauch effizient machen würde. Wenn gleichzeitig allerdings der Preis für Herkunftsnachweise durch den geringen Anteil erneuerbarer Energien sehr hoch ist, reizt dies wiederum einen geringeren Verbrauch an. Es führt jedoch zu einer besseren Systemintegration erneuerbarer Energien durch eine Ausrichtung der Flexibilität an der Einspeisung erneuerbarer Energien.

### **3.4 Pilotprojekte und Initiativen im Bereich granularer Herkunftsnachweise**

Granulare Herkunftsnachweise haben sich in den letzten Jahren nicht nur als theoretisches Konzept bewährt. Erste Unternehmen haben bereits Pilotprojekte gestartet. So haben industrielle Schwergewichte wie Google angekündigt, ihren Stromverbrauch bis 2030 rund um die Uhr zu 100 % aus erneuerbaren Energien zu beziehen (Google 2021). Dies lässt sich nur mit stündlichen Herkunftsnachweisen nachweisen. Auch in den USA gibt es erste Ambitionen, den granularen Markt auszubauen. So hat die Biden-Regierung im *American Jobs Plan* angekündigt, für staatliche Gebäude ebenfalls rund um die Uhr 100 % erneuerbarem Strom zu beschaffen (White House 2021).

Eine erste Umsetzung, die Herkunftsnachweise zumindest auf monatlicher Ebene betrachtet, startete 2021 in Frankreich. Seit dem 1. Januar 2021 muss der Verbrauch von Strom aus erneuerbaren Energiequellen monatlich ausgeglichen werden. Die Abrechnung der Herkunftsnachweise erfolgt zwar nach wie vor jährlich und Herkunftsnachweise sind 12 Monate gültig. Allerdings gibt es auf nationaler Ebene die Regelung, dass der Produktionsmonat des erzeugten Stroms dem Monat entsprechen muss, in dem der Strom auch verbraucht wurde. Diese Entscheidung wurde getroffen, um Herkunftsnachweise stärker mit dem physikalischen Stromverbrauch zu synchronisieren, das Preissignal zu stärken und mehr Transparenz für Endverbraucher sicherzustellen.

Die Idee, Herkunftsnachweise auf stündlicher Ebene auszustellen und zu entwerfen, haben bereits verschiedene Initiativen und Pilotprojekte umgesetzt. Die wohl größte Initiative im Bereich granularer Herkunftsnachweise ist EnergyTag (EnergyTag 2021). Sie wurde 2020 in London von Phil Moody, dem Gründer des europäischen Verbands der Zertifikateausgeber AIB, ins Leben gerufen und hat es sich zur Aufgabe gemacht, einen Markt für stündliche Herkunftsnachweise einzuführen. Wie schon bei der Einführung von Herkunftsnachweisen ist die Initiative von Akteuren aus der Industrie getrieben. EnergyTag hat derzeit etwa 60 Mitglieder, die aus Versorgungsunternehmen, Energiekonsumenten, Netzbetreibern, staatlichen Behörden sowie Nicht-Regierungsorganisationen und Start-Ups bestehen. Das Ziel von EnergyTag ist es, den Energiemarkt transparenter zu gestalten, sodass sichergestellt werden kann, dass in Echtzeit grüner Strom zur Verfügung gestellt wird. Dabei hat EnergyTag drei Hauptziele:

1. Standardisierung für stündliche Herkunftsnachweise und Guidelines für einen Markt,
2. Koordination von Pilotprojekten, um Marktentwicklung zu zeigen,
3. auf die Wichtigkeit von stündlichen HKN aufmerksam machen.

Ein von EnergyTag ausgehendes, großes Pilotprojekt wurde beispielsweise bereits in einer Kooperation von Microsoft und Vattenfall in Schweden abgeschlossen, bei der Vattenfall zu jeder Stunde im Jahr grünen Strom für drei Datenzentren bereitgestellt hat. Dies ist ein erster Schritt für Microsofts ambitioniertes Ziel, bis 2025 rund um die Uhr zu 100 % erneuerbare Energien zu nutzen. Microsoft hat des Weiteren in einem Pilotprojekt in einem seiner Datenzentren in Amsterdam die Softwareplattform FlexiDAO (ebenfalls Mitglied bei EnergyTag) genutzt, um stündliche Zertifikate, die über Wind auf See generiert werden, zu entwerten (FlexiDAO 2021)

Die europäische Strombörse Nord Pool – ebenfalls Mitglied bei EnergyTag – formulierte im Dezember 2021 das Ziel, einen Spotmarkt für stündliche Herkunftsnachweise mithilfe des Start-Ups Granular zu designen (Nord Pool 2021). Dabei soll die eigene Infrastruktur genutzt werden, um ein Konzept für stündliche Herkunftsnachweise zu erarbeiten. Des Weiteren wurden für das Jahr 2022 europaweite Workshops zu granularen Herkunftsnachweisen angekündigt, um das Marktdesign zu testen.

Auch aus Deutschland kommen Mitglieder, die sich in die EnergyTag-Initiative mit einbringen. Dazu gehören unter anderem das Hamburg Institut oder das Unternehmen Lumenaza mit Sitz in Berlin, das eine SaaS-Plattform für grüne Energieunternehmen bereitstellt (Lumenaza 2021).

## 4 ABDECKUNGSGRAD UND BESCHAFFUNGSKOSTEN VERSCHIEDENER ERNEUERBARER TECHNOLOGIEN

### 4.1 Erzeugungs- und Nachfrageprofile im jährlichen und täglichen Vergleich

Im vorigen Kapitel konnten wir sehen, dass die Anteile erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung im Jahr 2020 eine hohe Volatilität aufwiesen. Der Verlauf dieser Volatilität unterscheidet sich zwischen verschiedenen Erneuerbaren-Technologien. Um eine bessere Vorstellung davon zu bekommen, wie die verschiedenen erneuerbaren Technologien bestimmte Nachfrageverläufe erfüllen können, wollen wir in diesem Kapitel den Abdeckungsgrad von Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See betrachten.

Wir definieren den Abdeckungsgrad einer Erneuerbaren-Technologie als den Anteil, den diese Technologie zur Erfüllung von exemplarischen Nachfrageprofilen beitragen kann. Bei stündlicher Betrachtung unterscheidet sich der Abdeckungsgrad zwischen verschiedenen Erneuerbaren-Technologien stark, da die Einspeiseprofile dieser Technologien sehr unterschiedlich sind. Während Photovoltaik beispielsweise von der Sonne abhängig ist und die Produktionsspitze in der Mittagszeit liegt, sind Wind an Land und auf See teilweise auch nachts verfügbar. Die vorliegende Analyse soll einerseits zeigen, wie sich dies auf den Abdeckungsgrad für verschiedene Nachfrageprofile auswirkt, wie etwa Haushalts- und Gewerbekunden. Andererseits ziehen wir einen Vergleich zwischen Abdeckungsgrad und Preisen für so genannte *Power Purchase Agreements* (PPA) verschiedener erneuerbarer Energiequellen. Der Fokus der Analyse liegt auf individuellen Erzeugungs- und Nachfrageprofilen. Anhand von drei beispielhaften Nachfrageprofilen wollen wir verdeutlichen, wie verschiedene erneuerbare Energien im stündlichen Verlauf im Vergleich zu diesen Nachfrageprofilen produzieren und anhand dieser Daten den Abdeckungsgrad berechnen.

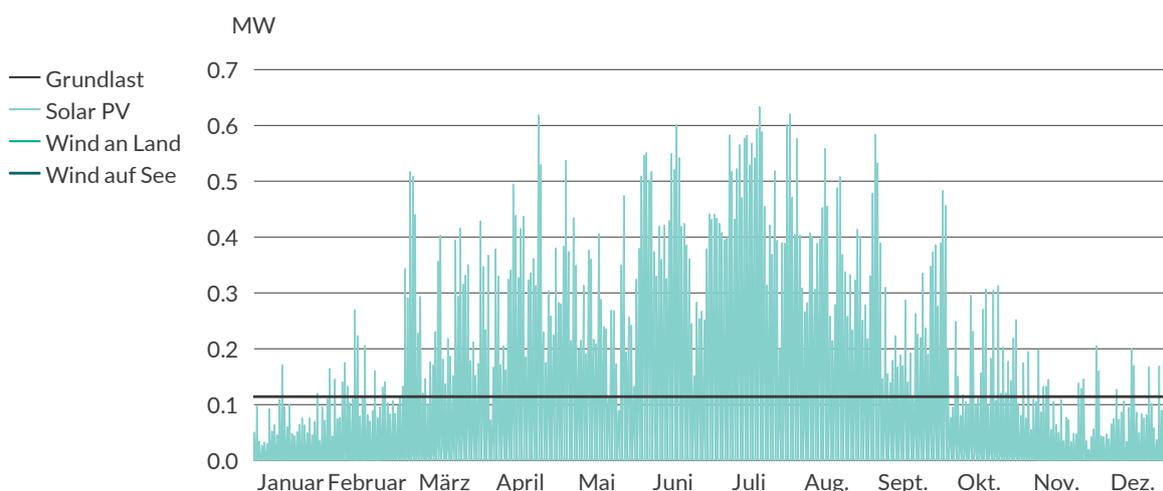
Für die folgende Analyse berechnen wir exemplarisch anhand eines auf je 1.000 MWh im Jahr normierten Stromverbrauchs sowie einer gleichermaßen normierten Stromproduktion den stündlichen Abdeckungsgrad verschiedener Erneuerbaren-Technologien. Auf jährlicher Basis wäre also eine hundertprozentige Abdeckung gewährleistet, da die Produktionsmenge die Nachfragemenge exakt abdeckt. Bei stündlicher Betrachtung ist dies nicht der Fall, da die Stromerzeugung erneuerbarer Energien innerhalb eines Jahres schwankt. Um diese stündliche Granularität abzubilden, betrachten wir stündliche Produktions- und Nachfrageprofile, bei denen hohe Volatilität auftritt. Wir erwarten einen deutlich geringeren durchschnittlichen stündlichen Abdeckungsgrad sowie deutliche saisonale und tägliche Schwankungen. Für die Analyse untersuchen wir drei exemplarische Nachfrageprofile:

1. **Konstantes Grundlast-Lastprofil:** Konstanter Verbrauch von insgesamt 1.000 MWh im Jahr. Dies ist insbesondere für durchproduzierende Großindustrien, wie zum Beispiel Chemieunternehmen, von Interesse.
2. **Durchgehendes Gewerbe-Lastprofil:** Gewerbliche Verbrauchsstellen mit einem relativ gleichmäßigen Verbrauchsverlauf mit deutlich durchlaufendem Sockel, wie etwa Kläranlagen, Kühlhäuser und Trinkwasser-Pumpen, normiert auf einen Verbrauch von 1.000 MWh im Jahr.
3. **Haushalts-Lastprofil:** Verbrauchsverlauf eines typischen Haushalts mit haushaltüblichen Schwankungen (Anstieg in den Abendstunden, Minimum in der Nacht), normiert auf einen Verbrauch von 1.000 MWh im Jahr. Das Profil basiert auf einer Standard-Lastprofil-Beschaffung für mehrere Haushalte.

Auf der Erzeugungsseite verwenden wir die Erzeugungsprofile von Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See, ebenfalls normiert auf 1.000 MWh im Jahr. Die Erzeugungsmuster beruhen auf dem als durchschnittlich zu bewertendem Wetterjahr 2013, da es frei von außergewöhnlichen Wetterereignissen war. Die Nutzungsgrade der erneuerbaren Technologien hingegen hängen nicht von einem Wetterjahr ab, sondern entsprechen dem langfristigen Mittel.

Um einen Überblick zu erhalten, wie die verschiedenen Erzeugungstechnologien im Jahresverlauf produzieren, sind in Abbildung 6 die auf eine Energiemenge von 1.000 MWh/Jahr normierten Erzeugungsprofile von Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See in stündlicher Auflösung zu sehen. Des Weiteren ist das konstante Grundlastprofil abgebildet, das ebenfalls auf 1.000 MWh/Jahr normiert ist. Es ist zu erkennen, dass die Erzeugungsprofile eine hohe Volatilität aufweisen. Während in einigen Stunden des Jahres die einzelnen Erneuerbaren-Technologien mehr erzeugen, als zur Abdeckung des Grundlastprofils notwendig ist, liegt in anderen Stunden eine Unterdeckung vor. Grafisch ist hier bereits feststellbar, dass der Abdeckungsgrad für alle drei Technologien unter 100 % liegt. Dies bestätigt unsere eingehende Erwartung und macht den Unterschied zwischen jährlicher und stündlicher Abrechnung von Herkunftsnachweisen deutlich: Jede Technologie produziert im Jahresverlauf 1.000 MWh und könnte damit bei jährlicher Abrechnung einen Abdeckungsgrad von 100 Prozent bieten. Bei stündlicher Betrachtung wird jedoch deutlich, dass zwar die Summe der Erzeugung mit der Summe des Verbrauchs übereinstimmt, die stündlichen Verläufe sich jedoch signifikant unterscheiden. So wird in vielen Stunden keine vollständige Abdeckung erreicht. Ohne einen zusätzlichen Speicher oder Flexibilitätsmechanismus können Schwankungen nicht ausgeglichen werden: Wird in einer Stunde mehr produziert, als zur Deckung der Nachfrage notwendig ist, kann diese Überproduktion nicht direkt genutzt werden, um in Stunden mit weniger Erneuerbaren-Produktion eine höhere Abdeckung zu erreichen.

In der Abbildung 6 wird ebenfalls deutlich, dass aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung im Sommer die Abdeckung von Photovoltaik vor allem im Winter geringer ist, während wegen durchschnittlich mehr Windaufkommen im Winter die Abdeckung für Wind an Land im Sommer geringer ist. Wind auf See produziert insgesamt gleichmäßig.



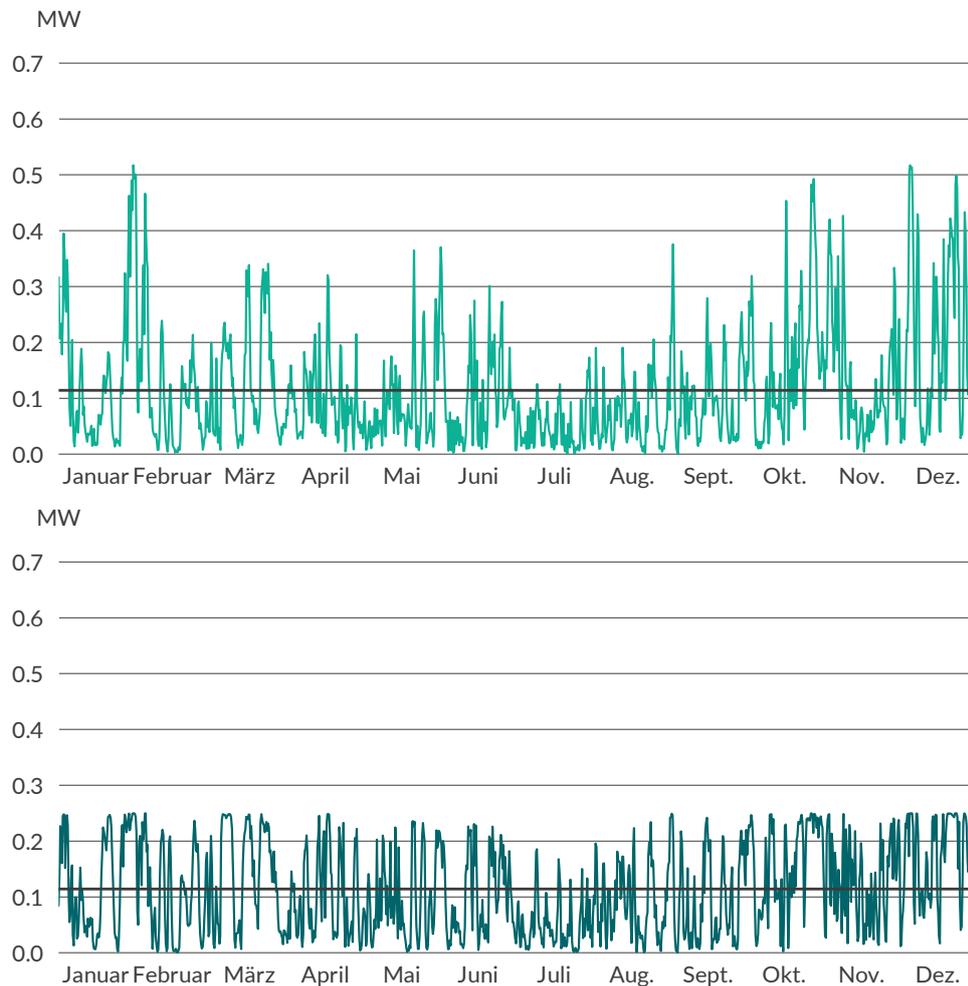


Abbildung 6: Jährliche Erneuerbaren-Erzeugungsprofile und konstantes Grundlastprofil, jeweils normiert auf 1000 MWh/Jahr (Aurora Energy Research 2021b)

Für jedes Nachfrageprofil haben wir anschließend den Abdeckungsgrad für die jeweilige Technologie berechnet. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet. Photovoltaik weist einen Abdeckungsgrad von 40 % am Grundlast-Nachfrageprofil auf, d.h. in der stündlichen Betrachtung konnte 40 % des Grundlast-Verbrauches durch PV gedeckt werden. Dies entspricht dem geringsten jährlichen Abdeckungsgrad der analysierten Erneuerbaren-Technologien: Wind auf See weist mit 69 % direkt gefolgt von Wind an Land mit 65 % den höchsten Abdeckungsgrad auf. Erwartungsgemäß liegt der Abdeckungsgrad von Photovoltaik im Haushalts-Nachfrageprofil höher als im Grundlast-Nachfrageprofil, da die Lastspitzen des Haushaltsprofils vor allem tagsüber auftreten, wenn viel Strom aus PV erzeugt wird, während für die Windtechnologien aufgrund geringerer Abdeckung am Tag und Überproduktion in der Nacht die Werte sinken.

Lastprofil	Photovoltaik	Wind an Land	Wind auf See
<b>Grundlast</b>	40 %	65 %	69 %
<b>Durchgehendes Gewerbe</b>	42 %	66 %	70 %
<b>Haushalt</b>	44 %	63 %	67 %

*Tabelle 1: Abdeckungsgrade von Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See für konstantes Grundlastprofil (Aurora 2021a), Haushaltsprofil (GVV Energie 2021) und Lastprofil für durchgehendes Gewerbe (Stromnetz Berlin 2021). Jeweils normiert auf 1.000 MWh/Jahr.*

Um die Unterschiede im Abdeckungsgrad innerhalb eines Tages sowie zwischen Jahreszeiten besser zu verstehen, sind in Abbildung 7 die Erzeugungsprofile der betrachteten Erneuerbaren-Technologien sowie die variablen Lastprofile (Gewerbe und Haushalt) für jeweils einen durchschnittlichen Sommer- und Wintertag dargestellt. Dazu haben wir für den Sommertag für die jeweiligen Erzeugungs- und Lastprofile den Durchschnitt aus allen Stunden in den Monaten Juni, Juli und August (bzw. Dezember, Januar und Februar für den Wintertag) gebildet. In Tabelle 2 sind die dazugehörigen Abdeckungsgrade aufgelistet.

Da alle Erzeugungstechnologien und die Lastprofile auf 1.000 MWh normiert sind, handelt es sich bei der dargestellten Erzeugung und dem Verbrauch nicht um die absolute tatsächliche Erzeugung beziehungsweise den absoluten tatsächlichen Verbrauch in den dargestellten Stunden. Beispielsweise liegt die Erzeugung von Wind an Land in der Abbildung 7 über der Erzeugung von Wind auf See. Dies ist darin begründet, dass Wind an Land im Winter mehr ins Netz einspeist als in anderen Jahreszeiten, während Wind auf See über das Jahr verteilt gleichmäßig produziert. Bei einer auf 1.000 MWh normierten Erzeugung speist Wind an Land daher im Winter mehr ins Netz ein als Wind auf See.

In Abbildung 7 ist klar zu erkennen, dass die Erzeugung erneuerbarer Energien innerhalb eines Tages für alle Technologien schwankt. Besonders ausgeprägt ist dies für Photovoltaik mit einer deutlichen Erzeugungsspitze am Mittag. Wind an Land und auf See schwanken im Vergleich zu Photovoltaik weniger. Dies liegt daran, dass wir Durchschnittswerte für mehrere Monate betrachten. Während das Erzeugungsmuster für Photovoltaik gleichmäßig und daher auch im Durchschnitt sehr gut zu erkennen ist, folgt die Winderzeugung keinem klaren Verlauf und wird daher durch die Durchschnittsbildung geglättet. An einzelnen Tagen sind die stündlichen Schwankungen für Wind wesentlich ausgeprägter. Auch die absolute Höhe der Winderzeugung kann wesentlich geringer ausfallen, zum Beispiel in Momenten der sogenannten kalten Dunkelflaute (wenig Wind in der Nacht).

Es gibt ebenfalls saisonale Unterschiede im Erzeugungsprofil. Die Erzeugungsspitze von Photovoltaik gegen Mittag ist im Sommer wesentlich stärker als im Winter und überdeckt somit die Lastprofile. Dies ist auch im Abdeckungsgrad erkennbar: Während im Sommer Photovoltaik einen Abdeckungsgrad von

über 60 % im Haushalts- sowie Gewerbe-Lastprofil aufweist, können im Winter durchschnittlich nur 31 – 32 % erreicht werden. Im Vergleich dazu sind Wind an Land- und Wind auf See-Erzeugung weniger variabel und absolut höher im Winter. Wind auf See liefert beispielsweise eine hohe Abdeckung von durchschnittlich 100 % für das Grundlastprofil und von 91 % für das Gewerbepprofil im Winter.

Da es sich hier um saisonale Durchschnittstage handelt, unterscheiden sich die Abdeckungsgrade von den jährlichen Durchschnitten. Der Abdeckungsgrad für Wind an Land und auf See ist im Winter höher als der jährliche Durchschnitt und nähert sich im Sommer dem jährlichen Durchschnitt an. Für Photovoltaik ist der Abdeckungsgrad im Sommer höher und im Winter geringer als der jährliche Durchschnitt.

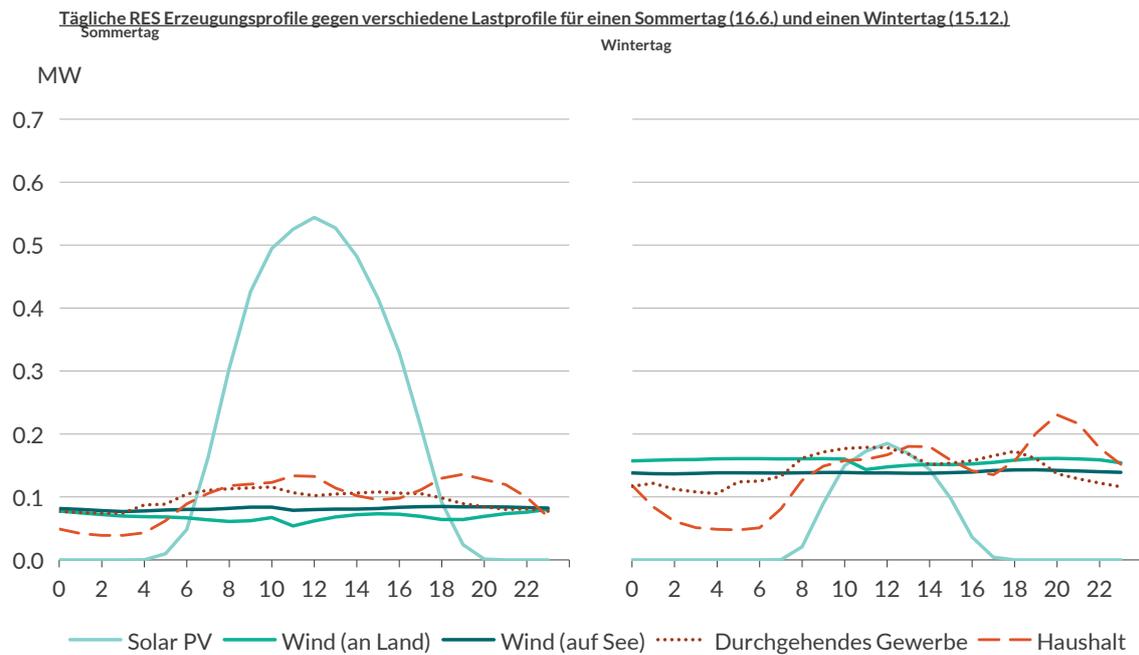


Abbildung 7: Tägliche Erneuerbaren-Erzeugungsprofile (Aurora 2021a) gegen Lastprofil für durchgehendes Gewerbe (GGV Energie 2021) und Haushaltslastprofil (Stromnetz Berlin 2021) im Tagesverlauf im Sommer (links) und im Winter (rechts)

Lastprofil	Sommertag			Wintertag		
	Photovoltaik	Wind an Land	Wind auf See	Photovoltaik	Wind an Land	Wind auf See
<b>Grundlast</b>	55 %	60 %	71 %	30 %	100 %	100 %
<b>Durchgehendes Gewerbe</b>	62 %	71 %	84 %	31 %	96 %	91 %

<b>Haushalt</b>	64 %	63 %	75 %	32 %	91 %	85 %
-----------------	------	------	------	------	------	------

Tabelle 2: Durchschnittliche Abdeckungsgrade für Sommer und Winter für verschiedene Lastprofile (Eigene Berechnungen basierend auf Aurora 2021a, GGV Energie 2021, Stromnetz Berlin 2021)

## 4.2 Vergleich zwischen Abdeckungsgrad und marktbasieren Beschaffungskosten

In einem zweiten Schritt ziehen wir nun einen Vergleich zwischen dem Abdeckungsgrad verschiedener Erneuerbaren-Technologien und den marktbasieren Beschaffungskosten durch langfristige Stromabnahmeverträge (sog. Power Purchase Agreements). Anhand dieses Vergleichs ermitteln wir anschließend, für welche Kosten welche Technologie welchen Anteil des Verbrauchs stündlich abdecken kann. Power Purchase Agreements (PPAs) sind bilaterale Stromlieferverträge zwischen zwei Parteien, typischerweise zwischen einem Stromerzeuger und einem Stromverbraucher. Sie legen für eine bestimmte Zeitspanne (meist 8 – 15 Jahre) den Preis und die Liefermenge für Strom fest. PPAs reduzieren das Marktpreisrisiko, senken somit die Finanzierungskosten erneuerbarer Energien und bieten gleichzeitig eine langfristige Beschaffungsmöglichkeit für den Stromverbraucher.

Durch das in Deutschland vorgegebene Doppelvermarktungsverbot können für geförderte Erneuerbare-Anlagen keine Herkunftsnachweise ausgegeben werden. Für PPAs trifft dies nicht zu, da es sich hier um ein marktbasiertes Finanzierungsinstrument handelt. Folglich ist der Erhalt von Herkunftsnachweisen eine große Motivation für Stromverbraucher, da sie so die grüne Eigenschaft des Stroms nachweisen und vermarkten können. Die durch die im Rahmen eines PPA erzeugte Strommenge generierten Herkunftsnachweise sind daher ein Bestandteil des Preises von PPAs.

Um den Preis und die Kosten für eine bestimmte Technologie zu bestimmen, errechnen wir technologiespezifische Preise für PPAs. Basierend auf dem Aurora Central Szenario haben wir die in Tabelle 3 gelisteten Preise für PPAs für die Technologien Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See ermittelt. Wir haben sie dabei für Verträge mit einem fixierten Preis über eine Laufzeit von 10 Jahren mit dem Startpunkt 2023 sowie einer Abnahme der produzierten Energie „as produced“ berechnet – das Erzeugungsprofil haben wir dabei also nicht angepasst. Die Modellierung der Preise für PPAs basiert auf einer von Aurora eigens entwickelten Methode, die bei der Berechnung unter anderem den Grundlast-Preis, die Marktwerte sowie Risikobewertungen und auch Herkunftsnachweis-Preise mitberücksichtigt.

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass Photovoltaik die geringsten und Wind auf See die höchsten Preise für PPAs aufweist. Wenn ein Verbraucher nun seinen jährlichen Bedarf mit erneuerbarem Strom decken möchte, ist ein Photovoltaik-PPA aufgrund des vergleichbaren günstigsten Preises augenscheinlich die beste Wahl. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, hat allerdings Photovoltaik den geringsten stündlichen Abdeckungsgrad für alle betrachteten Lastprofile. Photovoltaik hat zwar im Vergleich zu Wind an Land und Wind auf See den geringsten Preis für PPAs, in vielen Stunden des Jahres ist Energie aus Photovoltaik allerdings nicht in der Menge verfügbar, wie es benötigt wird, um den Verbrauch vollständig abzudecken.

Um die Kosten für die verschiedenen Technologien angesichts der unterschiedlichen Abdeckungsgrade vergleichen zu können, teilen wir den PPA-Preis durch den Abdeckungsgrad für die verschiedenen Lastprofile. Dieser Quotient stellt die relativen Kosten der Technologie pro Abdeckung dar und kann

als eine Art „Preis-Leistungsverhältnis“ in Bezug auf den Abdeckungsgrad, allerdings nicht als Marktpreis interpretiert werden. Die Ergebnisse zu diesen gewichteten PPA-Preisen sind in Tabelle 3 zu sehen und ermöglichen es, die Kosten verschiedener Technologien unter Berücksichtigung ihres Abdeckungsgrads zu vergleichen.

		Photovoltaik	Wind an Land	Wind auf See
<b>PPA-Preise in €/MWh (real 2020)</b>		40,53	43,54	45,63
<b>Abdeckungsgrade</b>	<b>Grundlast</b>	40 %	65 %	69 %
	<b>Durchg. Gewerbe</b>	42 %	66 %	70 %
	<b>Haushalt</b>	44 %	63 %	67 %
<b>Gewichteter PPA-Preis in €/MWh (real 2020)</b>	<b>Grundlast</b>	100,82	66,94	66,48
	<b>Durchg. Gewerbe</b>	96,52	66,01	65,42
	<b>Haushalt</b>	91,41	69,61	68,25

*Tabelle 3: PPA-Preise, Abdeckungsgrad und resultierende gewichtete PPA-Preise für verschiedene Lastprofile*

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass sich durch die Gewichtung die Rangfolge der Technologien in Bezug auf Preise verschiebt. Durch die Gewichtung hat Photovoltaik nun durch den geringeren Abdeckungsgrad für alle drei Lastprofile den höchsten Preis für PPA. Ungewichtet ist Wind auf See mit einem etwa 5 € höheren Preis als Photovoltaik die teuerste Technologie, während mit der Gewichtung Photovoltaik um bis zu 34 € teurer ist als Wind auf See. Wind auf Land und Wind auf See weichen nach der Gewichtung für alle drei Lastprofile nur noch um maximal 1,37 € voneinander ab. Die Gewichtung ermöglicht es, eine realistischere Aussage zu treffen, welche Technologien das beste Preis-Leistungsverhältnis aufweisen, wenn statt einer jährlichen Betrachtung der stündliche Abdeckungsgrad berücksichtigt wird.

Dies zeigt klar die Fehlanreize auf, die jährliche Herkunftsnachweise für Verbraucher mit sich bringen: In einer jährlichen Abrechnung von Herkunftsnachweisen erscheint Photovoltaik als die eindeutig günstigste Technologie zur Deckung des Verbrauchs durch Erneuerbare, während Photovoltaik bei Berücksichtigung des stündlichen Abdeckungsgrads wesentlich teurer als Wind auf Land und Wind auf See ist.

## 5 GRANULARE HERKUNFTSNACHWEISE ALS FLEXIBILITÄTSANREIZ

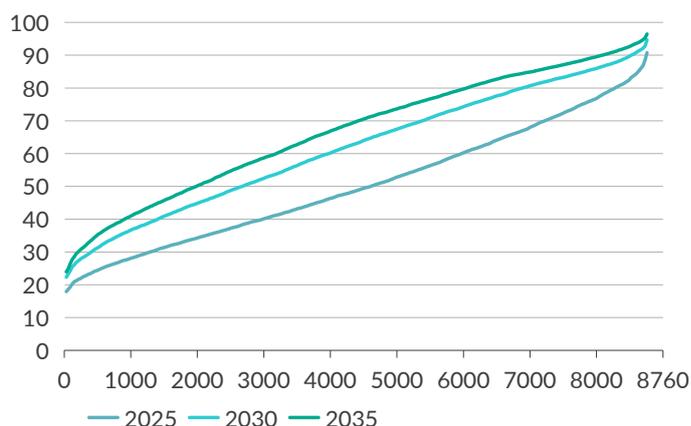
### 5.1 Entwicklung des stündlichen Anteils Erneuerbarer im Jahresverlauf

Im vierten Kapitel haben wir gezeigt, dass keine Erneuerbaren-Technologie einen vollständigen stündlichen Abdeckungsgrad der Nachfrage bietet. Der Abdeckungsgrad kann durch Anpassung der bestehenden Technologien erhöht werden, etwa durch eine optimierte Ausrichtung von Erneuerbaren und Nachfrageflexibilität. Zudem können neue Technologien Flexibilität bereitstellen, wie etwa Speicher und Wasserstoff-Elektrolyseure.

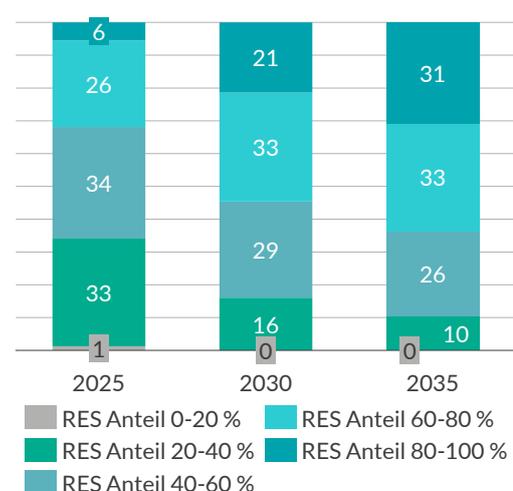
In diesem Kapitel wollen wir darstellen, wie granulare Herkunftsnachweise durch ihr stündliches Preissignal diese Technologien als Lösung für die im vierten Kapitel dargestellte Problematik anreizen können. Der Preis von Herkunftsnachweisen wird maßgeblich vom Anteil Erneuerbarer an der Stromerzeugung bestimmt: In Stunden mit geringem Erneuerbaren-Anteil trifft eine hohe Nachfrage nach Herkunftsnachweisen auf ein geringes Angebot. Dies würde zu hohen Preisen führen. Ein geringer Anteil erneuerbarer Energien signalisiert eine enge Marktsituation im Verhältnis zur Nachfrage nach Herkunftsnachweisen und ist daher ein besserer Indikator für hohe Herkunftsnachweispreise als beispielsweise die absolute Höhe der nicht aus Erneuerbaren gedeckten Nachfrage (die sogenannte Residuallast).

Um die Stunden mit geringem Erneuerbaren-Anteil zu bestimmen (im Folgenden als kritische Stunden bezeichnet), ermitteln wir in einem ersten Schritt in stündlicher Auflösung den Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Stromerzeugung jeweils für die Jahre 2025, 2030 und 2035. Durch die Auswahl der Jahre wollen wir einen Einblick in wichtige Stationen auf dem Weg zur Klimaneutralität geben. Die Ermittlung der kritischen Stunden gibt einen quantitativen Überblick über die Stunden, in denen die Preise der Herkunftsnachweise erwartungsgemäß höher sein werden und somit ein Flexibilitätsanreiz entsteht.

Anteil erzeugter erneuerbarer Energien  
%



Verteilung des Anteils erneuerbarer Energien



*Abbildung 8: Anteil erzeugter erneuerbarer Energien für die Jahre 2025, 2030 und 2035 in Aurora Central (Stand: Oktober 2021) und Verteilung des Anteils erneuerbarer Energien für die Jahre 2025, 2030 und 2035 in Aurora Central (Stand: Oktober 2021, Aurora 2021a)*

In Abbildung 8 ist der Anteil erzeugter erneuerbarer Energien für die Jahre 2025, 2030 und 2035 im Aurora Central Szenario abgebildet. Sowohl der minimale als auch der maximale Anteil Erneuerbarer steigt von 2025 zu 2035. Der Anteil erneuerbarer Energien erhöht sich im Laufe der Jahre, wie an der Verschiebung der Kurve nach oben zu erkennen ist.

Aus dieser Abbildung lässt sich nun die Verteilung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung für dieselben Jahre ableiten, abgebildet rechts neben den Verlaufskurven. Dabei wurde eine Einteilung in 20 %-Schritten vorgenommen. Um Flexibilitätsanreize zu erkennen und zu bewerten, betrachten wir den Anteil an kritischen Stunden in den Jahren 2025, 2030 und 2035. Kritische Stunden sind Stunden mit einem geringen Anteil erneuerbarer Energien. Wir definieren dies als Stunden, in denen der Anteil erneuerbarer Energien unter 40 % liegt.

Die Definition, ab welchem Anteil Erneuerbarer Stunden als kritisch gelten, hängt stark von der Nachfrage der Endverbraucher nach Erneuerbaren ab. Je höher die Nachfrage von Industrie und Endverbrauchern nach tatsächlich nachfragedeckenden Grünstromtarifen, desto höher der benötigte Anteil erneuerbarer Energien zur Deckung dieser Nachfrage. Die steigende Nachfrage nach PPAs in Deutschland, die wir für 2030 mit 131 TWh berechnen, ist ein starker Indikator für die Annahme, dass die Nachfrage nach grünem Strom in Deutschland zunehmen wird. Folglich ist die Annahme, dass Stunden mit weniger als 40 % Erneuerbaren-Anteil als kritische Stunden zu sehen sind, für die Jahre 2025, 2030 und 2035 plausibel.

Diese kritischen Stunden führen durch den geringen Erneuerbaren-Anteil erwartungsgemäß zu höheren Preisen für Herkunftsnachweise und sollten so Anreize für Flexibilität in Produktion und Nachfrage geben. Es ist ersichtlich, dass im Jahr 2025 im Central Szenario noch 34 % der Stunden kritische Stunden sind, das heißt einen Anteil von 0 – 40 % erneuerbarer Energien haben. Im Jahr 2035 sind es nur noch 10 %. Im Gegensatz dazu steigt der Anteil von Stunden mit 80 – 100 % Erneuerbaren-Anteil von 6 % auf 31 %. Der Anteil erneuerbarer Energien insgesamt steigt und der Anteil von Stunden mit hohem Erneuerbaren-Anteil nimmt ebenfalls zu. Nichtsdestotrotz ist klar zu erkennen, dass auch 2030 und 2035 noch ein großer Anteil an sogenannten kritischen Stunden verbleibt, in denen der Anteil erneuerbarer Energien an der Erzeugung gering ist. Zudem können wir davon ausgehen, dass nicht nur der Anteil Erneuerbarer wächst, sondern auch die Nachfrage nach stundenscharfen Grünstromtarifen. Mehr Angebot steht in diesem Fall also auch eine gesteigerte Nachfrage gegenüber.

Hier verbleibt ein Bedarf nach Flexibilität, die es ermöglicht, Verbrauch und Produktion besser am Erneuerbaren-Anteil auszurichten beziehungsweise durch Speichertechnologien den grünen Strom von Stunden mit hohem Erneuerbaren-Anteil in Stunden mit geringem Erneuerbaren-Anteil zu schieben. Das Preissignal von Herkunftsnachweisen kann hier eine wichtige Rolle spielen – zusätzlich zum Preissignal des Großhandelsmarkts. Auf dem Großhandelsmarkt führt der Technologiemix zwischen Erneuerbaren und regelbaren Technologien zu hoher Preisvolatilität, durch starke Unterschiede in den Grenzkosten der preissetzenden Technologie. Auch für Herkunftsnachweise erwarten wir vermehrte Preisvolatilität. Dies liegt daran, dass die Nachfrage nach granularen Herkunftsnachweisen steigen wird und somit in den Stunden, in denen der Anteil der Erneuerbaren niedriger ist, Preisspitzen entstehen. Durch Preisvolatilität und Preisspitzen können zusätzliche Einnahmen für Erneuerbare und Flexibilität über Herkunftsnachweise generiert werden. Dies fördert den marktbasierten Ausbau erneuerbarer Energien.

Durch das doppelte Preissignal des Großhandelsmarktes und der Herkunftsnachweise entsteht ein Anreiz, Flexibilität im Sinne von Verhaltensänderungen und Speichertechnologien an Stunden mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energie auszurichten. Im Großhandelsmarkt ist Preisvolatilität grundsätzlich nicht nur durch Erneuerbare bestimmt, sondern z.B. auch durch fossile Must-Run-Kapazität. Da sich Flexibilitätstechnologien an Preisunterschieden ausrichten und nicht an bestimmten Erzeugungstechnologien, kann es dazu kommen, dass beispielsweise Speicher in Situationen mit hoher fossiler Erzeugung aufladen (z.B. nachts bei niedriger Nachfrage mit gleichzeitig hoher Braunkohleerzeugung). Durch das doppelte Preissignal von Großhandelsmarkt und granularen Herkunftsnachweisen würde ein Anreiz entstehen, insbesondere in Zeiten hoher Erneuerbaren-Erzeugung zu laden. So steigt nicht nur die Profiabilität flexibler Geschäftsmodelle, sondern auch der Anreiz, Flexibilität an Erneuerbaren auszurichten.

Insgesamt entsteht so ein Flexibilitätsanreiz im System: Stunden, in denen der Anteil erneuerbarer Energien besonders niedrig ist, sind attraktiv für Flexibilität, da der Preis für Herkunftsnachweise erwartungsgemäß höher sein wird.

### *Sensitivitätsanalyse*

Die obenstehenden Berechnungen haben wir auf Basis des Aurora Central Szenarios durchgeführt. Dieses Szenario basiert auf den von uns als am wahrscheinlichsten betrachteten Annahmen zur zukünftigen Entwicklung. Es werden bereits umgesetzte oder implementierte Politikpfade abgebildet, jedoch nicht alle politischen Ziele. Für eine vollständige Zielerreichung sehen wir fehlende politische Weichenstellungen. Zudem erschweren regulatorische, technische und soziale Rahmenbedingungen eine vollständige und fristgerechte Umsetzung aller Ambitionen. Diese Unsicherheiten haben wir im Central Szenario berücksichtigt, um möglichst realistische Vorhersagen treffen zu können. Der Koalitionsvertrag gibt neue Politikziele vor, etwa einen Anteil erneuerbarer Energien von 80% des Bruttostrombedarfs 2030. Diese ambitionierten Ziele des Koalitionsvertrages sind in der Vorhersage des Central Szenarios nicht berücksichtigt.

Um zu überprüfen, ob die Kernaussagen dieses Kapitels auch mit einem höheren Ausbau erneuerbarer Energien vereinbar sind, führen wir eine Sensitivitätsanalyse durch. Dafür wiederholen wir unsere Berechnungen auf der Basis eines zweiten Szenarios: dem Aurora Net Zero Szenario. Net Zero beschreibt ein Szenario, das die Emissionsziele des deutschen Klimaschutzplans für Deutschland bis 2030 erreicht und ab 2045 komplett emissionsfrei ist. Die Nachfrage ist in diesem Szenario beispielhaft im Jahr 2030 um ca. 78 TWh höher als im Central Szenario. Gründe dafür sind eine Zunahme von Elektrifizierung des Wärme- und Transportsektors sowie die Erhöhung der Kapazitäten für Wasserstoff Elektrolyseure (die Wasserstoffnachfrage ist in Net Zero im Jahr 2030 um 53 TWh höher als in Central).

Wie in der Abbildung 9 zu erkennen, liegt das Net Zero Szenario bezüglich der Stromnachfrage im Zielkorridor des von der neuen Bundesregierung im Koalitionsvertrag vorgesehenen Bruttostrombedarfs von 680-750 TWh.

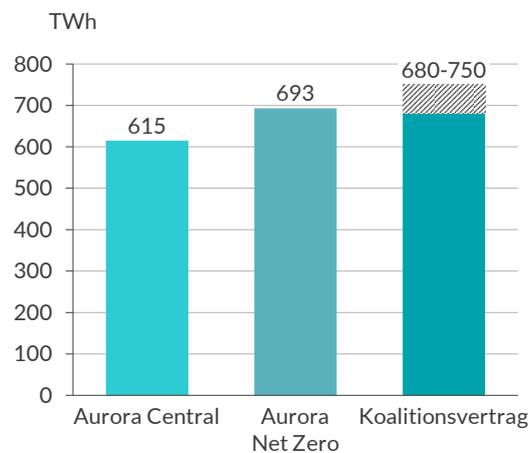


Abbildung 9: Stromnachfrage für das Jahr 2030 für die Aurora Szenarien Central und Net Zero sowie die im Koalitionsvertrag geschätzte Nachfrage (Aurora Energy Research 2021a, SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP, 2021)

Wir wiederholen die Berechnung der Verteilung des Anteils erneuerbarer Energien basierend auf dem Net Zero Szenario. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Wenn man nun einen Blick auf die Verteilung des Anteils Erneuerbarer Energien für das Net Zero Szenario wirft, ist feststellbar, dass sich die Stunden mit hohem Erneuerbaren-Anteil erhöhen. Jedoch gibt es nach wie vor kritische Stunden, in denen der Anteil erneuerbarer Energien an der Erzeugung gering bleibt. Auch in einem Szenario mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien können wir daher mit Preisvolatilität und Preisspitzen für Herkunftsnachweise rechnen, die Flexibilität anreizen.

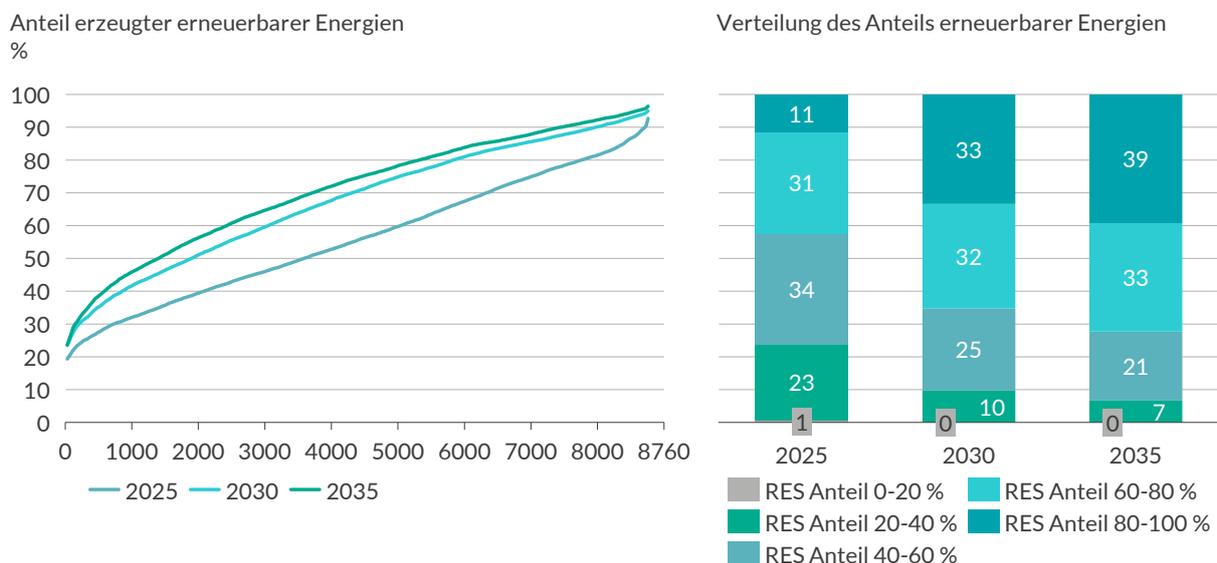


Abbildung 10: Anteil erzeugter erneuerbarer Energien für die Jahre 2025, 2030 und 2035 in Aurora Net Zero (Stand: Oktober 2021) und Verteilung des Anteils erneuerbarer Energien für die Jahre 2025, 2030 und 2035 in Aurora Net Zero (Stand: Oktober 2021, Aurora 2021a)

In beiden Szenarien verbleibt also eine Lücke: Erneuerbare können die Nachfrage nicht zu jeder Zeit vollständig abdecken. Bei einer Nachfrage nach 100 % Erneuerbaren, basierend auf stündlichen

Herkunftsnachweisen, ist zusätzliche Flexibilität notwendig. Wir können die Lücke folglich als Flexibilitätslücke bezeichnen.

## 5.2 Das Preissignal als Flexibilitätsanreiz

Um die Flexibilitätslücke zu quantifizieren, haben wir für das Central und das Net Zero Szenario für die Jahre 2025, 2030 und 2035 jeweils die durchschnittliche Residuallast in den 10 % der Stunden mit dem geringsten Erneuerbaren-Anteil extrahiert. Die Residuallast ist der Anteil der Stromproduktion, der nicht durch volatile Erneuerbare bedient werden kann. Es handelt sich also um den Restbedarf an Strom, der mehrheitlich aus konventionellen Quellen gedeckt werden muss. In der Abbildung 11 sind die durchschnittlichen Residuallasten als Säulen dargestellt, die korrespondierenden durchschnittlichen Erneuerbaren-Anteile für diese Stunden als Linien. Es ist zu sehen, dass die Residuallasten für das Net Zero Szenario im Schnitt geringer sind als im Central Szenario. Dies ist im Einklang mit dem oben erwähnten Punkt, dass der Erneuerbaren-Anteil im Net Zero Szenario höher ist. Zusätzlich sind die Maximalwerte der Residuallast für jedes Jahr und Szenario als Kreuze in der Abbildung ablesbar. Die jährliche maximale Residuallast ist im Net Zero-Szenario höher als im Central Szenario. Dies liegt an der zuvor erwähnten höheren Nachfrage im Net Zero Szenario, die gleichzeitig auf geringere konventionelle Kapazitäten aus Kohle- und Gaskraftwerken trifft. In Bezug auf die Residuallast sind Importe ein wichtiger Flexibilitätsmechanismus und erlauben Ausgleichseffekte, können aber die Flexibilitätslücke nicht vollständig schließen. Grund hierfür ist, dass die Erneuerbaren-Erzeugung in Europa aufgrund der Wetterkorrelation eine hohe Gleichzeitigkeit aufweist.

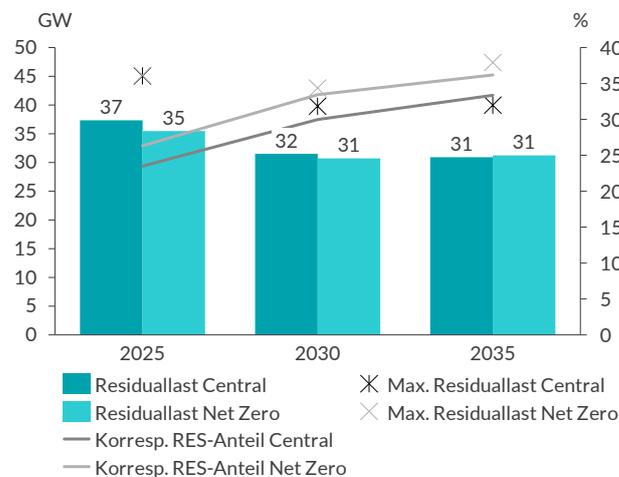


Abbildung 11: Durchschnittliche Residuallasten in den 10 % der Stunden mit dem geringsten Erneuerbaren-Anteil inklusive korrespondierendem durchschnittlichem Erneuerbaren-Anteil für die Szenarien Aurora Central und Net Zero. Ebenfalls abgebildet ist die maximale Residuallast, die im jeweiligen Szenario auftritt (Aurora Energy Research 2021a)

Um die Flexibilitätslücke und Flexibilitätsanreize besser zu verstehen, betrachten wir im nächsten Schritt den Anteil erneuerbarer Energien für einen durchschnittlichen Sommer- sowie Wintertag für das Central Szenario im Jahr 2035, wie in Abbildung 12 dargestellt.

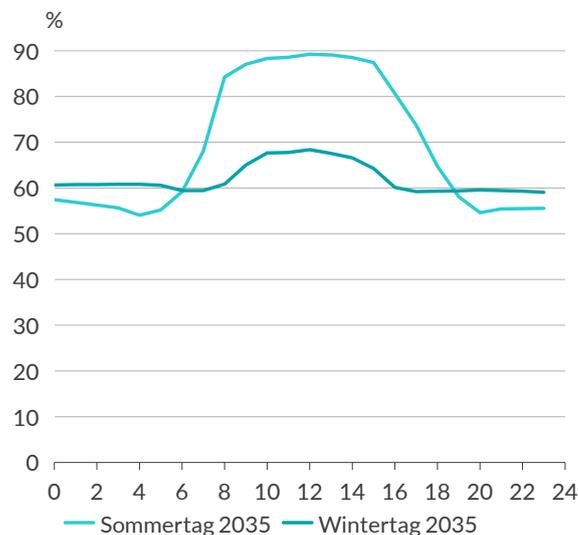


Abbildung 12: Durchschnittlicher Anteil erneuerbarer Energien im Sommer und Winter im Tagesverlauf für das Aurora Central Szenario für das Jahr 2035 (Aurora Energy Research 2021a)

Es ist ersichtlich, dass der Anteil erneuerbarer Energien im Sommer deutlich höhere Werte erreicht als im Winter, insbesondere während der Tageslichtzeit im Sommer (6 – 20 Uhr). In der Spitze wird ein Anteil von 89 % erreicht. In der Nacht sinkt der Anteil im Sommer auf durchschnittlich 55 %. Im Winter hingegen sinkt der Anteil in der Nacht auf 59 % während tagsüber ein Anteil von 68 % erreicht wird. Insgesamt ist der Anteil Erneuerbarer im Winter weniger volatil als im Sommer. Die deutliche Diskrepanz zwischen Sommer- und Wintertag lässt darauf schließen, dass die Wintermonate signifikant zu den Stunden mit geringem Erneuerbaren-Anteil beitragen.

Aus diesen Schwankungen ergeben sich Flexibilitätsanreize mit unterschiedlicher Granularität. Einerseits wird kurzfristige Flexibilität angereizt, die sich aus stündlichen Preisunterschieden innerhalb eines Tages ergibt. Andererseits schwankt der Erneuerbaren-Anteil auch wöchentlich und saisonal, was sich in unterschiedlichen Preisen von Herkunftsnachweisen niederschlägt. Diese Preisunterschiede setzen Anreize für mittelfristige und langfristige Flexibilität.

Stunden, in denen der Anteil erneuerbarer Energien besonders niedrig ist, sind attraktiv für Flexibilität, da der Preis für Herkunftsnachweise erwartungsgemäß höher sein wird. Es entsteht ein Anreiz, in Stunden mit hohen Preisen mehr zu produzieren beziehungsweise weniger nachzufragen, und in Stunden mit niedrigen Preisen weniger zu produzieren beziehungsweise mehr nachzufragen. Speicher können so durch Ein- und Ausspeichern den Anteil grünen Stroms im Netz verschieben. Verschiedene Technologien können Flexibilität bereitstellen.

- Erneuerbare können durch eine bessere Ausrichtung die Zeiten der Einspeisung besser mit der Preisdynamik von Herkunftsnachweisen synchronisieren, beispielsweise durch Änderung in Ausrichtung von PV-Anlagen von Süden nach Ost-West. Durch eine Ost-Westausrichtung wird mehr in den Morgen- und Abendstunden produziert. Dies führt zu einer besseren

Systemintegration, da mehr in den Stunden produziert werden würde, in denen die PV-Abdeckung generell gering ist.

- Es entstehen zudem Anreize für Nachfrageflexibilität. Ein zusätzliches Preissignal durch Herkunftsnachweise würde es für die Industrie beispielsweise attraktiver machen, in Stunden mit hohem Erneuerbaren-Anteil mehr Strom durch mehr Produktion zu verbrauchen und in Stunden mit geringem Anteil die Produktion herunterzufahren. Verglichen mit einer jährlichen Ausgestaltung von Herkunftsnachweisen entsteht so beispielsweise ein Anreiz, die Nachfrage spezifisch an die Stromlieferung des PPAs auszurichten, was die Systemintegration erleichtert.
- Auch Speicher in Kombination mit Erneuerbaren können durch granulare Herkunftsnachweise angereizt werden. Preisvolatilität kann ein Anreiz sein, in Stunden mit hohem Erneuerbaren-Anteil lokale Speicher zu füllen und diese (auf stündlicher Ebene) beispielsweise in der Nacht bei wenig Sonne und Wind einzuspeisen. Prinzipiell werden auch langfristige Speicher angereizt, die beispielsweise im Sommer Erneuerbare speichern können, um im Winter bei einem geringeren Abdeckungsgrad einzuspeisen.
- Auch Wasserstoff-Elektrolyseure, die zur Erzeugung grünen Strom beziehen müssen, haben durch ein granulares Preissignal Anreize, grünen Wasserstoff zu produzieren, wenn der Anteil erneuerbarer Energien im System besonders hoch ist.

Die Vielfalt der Flexibilitätsmöglichkeiten unterstreicht eine weitere Stärke des Preissignals von Herkunftsnachweisen: Es ist technologieneutral. Als marktbasierendes Preissignal ermöglicht es einen Innovationswettbewerb. Wenn durch einen geringen Erneuerbaren-Anteil beispielsweise ein Bedarf nach mehr Flexibilität entsteht, wird dies im Preissignal gespiegelt. Die Technologie, die hier am effizientesten Flexibilität bereitstellen kann, folgt dem Preissignal. Der Markt erlaubt somit, die günstigste Flexibilitätstechnologie im richtigen Umfang einzusetzen. Dies ist ein Vorteil gegenüber regulatorischen Vorgaben, die keine perfekte Sicht auf Flexibilitätskosten oder benötigten Umfang haben und somit nicht die gesamtwirtschaftlich effiziente Lösung bereitstellen können.

Ein stündliches Preissignal für Herkunftsnachweise setzt kurz-, mittel- und langfristige Flexibilitätsanreize. Dies erweitert den Betrachtungszeitraum für Flexibilitätslösungen und führt dazu, dass frühzeitig in Innovationen investiert wird, die sich ohne das Preissignal von Herkunftsnachweisen heute noch nicht lohnen würden. Kostenentwicklung und Lernkurven neuer Technologien werden so beschleunigt.

## 6 HANDELSEMPFEHLUNGEN FÜR EIN GRANULARES MARKTDESIGN VON HERKUNFTSNACHWEISEN

Herkunftsnachweise als marktbasierter Instrument erleichtern den Weg zur Klimaneutralität, indem sie den Ausbau erneuerbarer Energien fördern. Für eine marktbasierter Energiewende und das Erreichen der Klimaziele ist ein effizientes Marktdesign für Herkunftsnachweise daher ein wichtiger Baustein.

Unsere Analyse hat gezeigt, dass eine granulare Ausgestaltung von Herkunftsnachweisen durch ein Preissignal wichtige Flexibilitätsanreize setzt, die die Systemintegration erneuerbarer Energien verbessern werden und den marktbasierter Ausbau Erneuerbarer unterstützen. Wie in der von EPICO KlimaInnovation veröffentlichten Studie zum klimaneutralen Stromsystem dargestellt, ist langfristig ein Zubau erneuerbarer Energieträger ohne staatliche Unterstützung möglich, sofern es ausreichend Möglichkeiten zur privaten Finanzierungsabsicherung gibt. Grund hierfür sind unter anderem Erlösmöglichkeiten durch weiterhin stabile Strompreise aufgrund teurer alternativer Erzeugungstechnologien (EPICO 2021b). Herkunftsnachweise sind eine weitere Einnahmequelle für Erneuerbare und können somit den marktbasierter Ausbau Erneuerbarer fördern.

Verschiedene Schritte sind notwendig, um die Vorteile einer granularen Ausgestaltung von Herkunftsnachweisen umzusetzen:

1. **Die Abrechnung von Herkunftsnachweisen sollte stündlich statt jährlich erfolgen.**

Eine stündliche Ausgestaltung stellt zu diesem Zeitpunkt die optimale Granularität als Trade-Off zwischen Anreizwirkung und Transaktionskosten dar. Die granulare Ausgestaltung hilft, den physikalischen Stromverbrauch mit der Erneuerbaren-Erzeugung zu synchronisieren, das Preissignal zu stärken und mehr Transparenz für Endverbraucher sicherzustellen. So wird auch dem Vorwurf des *Greenwashings* entgegengewirkt. Für die Liquidität des europäischen Marktes für Herkunftsnachweise und im Sinne der europäischen Energiewende ist es ideal, wenn die Anpassung nicht nur in Deutschland, sondern in allen europäischen Ländern vorgenommen wird. Zur Umsetzung dieser Änderung braucht es eine Anpassung der europäischen Erneuerbaren-Richtlinie und eine Umsetzung durch das deutsche Erneuerbaren-Energien-Gesetz sowie durch die entsprechende Durchführungsverordnung, in der die stündliche Granularität vorgeschrieben wird.

2. **Die genaue Ausgestaltung eines granularen Marktdesigns für Herkunftsnachweise, insbesondere das Handelssystem, sollte dabei gründlich auf die angestrebte Anreizwirkung abgestimmt werden.**

Die Parametrisierung des Marktdesigns beeinflusst die Effizienz der Lösung erheblich. Während eine stündliche Ausgestaltung von Herkunftsnachweisen optimal ist, könnte es beispielsweise zu hohen Transaktionskosten für Unternehmen führen, wenn diese jede Stunde kontinuierlich abrechnen müssen, dass sie stündliche Herkunftsnachweise in Höhe ihres Verbrauchs besitzen. Die Nachweisführung über die Verwendung der von Herkunftsnachweisen sollte daher in größeren Intervallen ausgestaltet sein als die Granularität der Herkunftsnachweise selbst. Dies ist auch in Frankreich der Fall: es muss jährlich nachgewiesen werden, dass Verbrauch und Herkunftsnachweise monatlich übereinstimmen. Auch die Entwicklung von börsengestützten Auktionen wird durch Preistransparenz zur Entwicklung des Marktes von Herkunftsnachweisen beitragen. Im Gegensatz zum bilateralen Handel führt eine börsengestützte Auktion zu einem öffentlich verfügbaren Preissignal für jede

Lieferperiode. Dies bündelt nicht nur Liquidität und senkt die Transaktionskosten durch Standardisierung, sondern erhöht ebenfalls die Sichtbarkeit der Marktsituation und trägt somit zur Marktentwicklung bei.

Ein möglicher Ansatz ist eine schrittweise Anpassung der Granularität von jährlichen hin zu monatlichen und schließlich stündlichen Herkunftsnachweisen, um Marktakteure ausreichend Zeit zur Implementierung der Änderungen zu geben. In einem nächsten Schritt kann überlegt werden, die Anpassung von Herkunftsnachweisen an die physikalische Realität noch weiter zu fokussieren, indem beispielsweise die verfügbare grenzüberschreitende Interkonnektoren-Kapazität beim Handel mit Herkunftsnachweisen berücksichtigt wird. Dies würde garantieren, dass der Erneuerbaren-Strom auch tatsächlich aus einem Land ins andere fließen kann.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

**Aurora Energy Research**, 2021a. *German Power Market Forecast April 2021*. [Online] Verfügbar unter: <https://eos.auroraer.com/dragonfly/insights/deupowermarket/home> [Zugriff am 15.12.2021] (Zugang nur für Abonnenten)

**Aurora Energy Research**, 2021b. *Models*. [Online] Verfügbar unter: <https://auroraer.com/company/models/> [Zugriff am 15.12.2021].

**BMWi**, 2021. *Deutsche Klimaschutzpolitik*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html> [Zugriff am 22.12.2021]

**BMWi**, 2020. *Die nationale Wasserstoffstrategie*. [Online] Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20) [Zugriff am 17.12.2021]

**Bundesregierung**, 2021. *Erneuerbare Energien – ein neues Zeitalter*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energie-erzeugen/erneuerbare-energien-317608> [Zugriff am 22.12.2021]

**EEG**, 2021. *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist*. [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/EEG\\_2021.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2021.pdf)

**EnergyTag**, 2021. *EnergyTag and granular energy certificates: Accelerating the transition to 24/7 clean power*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.energytag.org/wp-content/uploads/2021/05/EnergyTag-and-granular-energy-certificates.pdf> [Zugriff am 17.12.2021]

**ENTSO-E**, 2021. *ENTSO-E Transparency Platform*. [Online] Verfügbar unter: <https://transparency.entsoe.eu/> [Zugriff am 15.12.2021]

**EPEX SPOT**, 2021. *EPEX SPOT to launch first pan-European Guarantees of Origins market in 2022*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.epexspot.com/en/news/epex-spot-launch-first-pan-european-guarantees-origin-market-2022> [Zugriff am 17.12.2021]

**EPICO**, 2021a. *Policy Accelerator for Climate Innovation*. [Online] Verfügbar unter: <https://epico.org/en/accelerator> [Zugriff am 21.12.2021]

**EPICO**, 2021b. *Der Weg zum klimaneutralen Stromsystem – Aufbruch zu einem marktwirtschaftlichen Erneuerbaren-Zubau in Deutschland*. [Online] Verfügbar unter: [https://epico.org/uploads/images/EPICO\\_Der-Weg-zum-klimaneutralen-Stromsystem.pdf](https://epico.org/uploads/images/EPICO_Der-Weg-zum-klimaneutralen-Stromsystem.pdf) [Zugriff am 21.12.2021]

**Europäische Kommission**, 2021. *Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*, Brüssel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0767R%2801%29>

**Europäische Kommission**, 2020. *A hydrogen strategy for a climate neutral Europe*. [Online] Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf) [Zugriff am 17.12.2021]

**Europäische Kommission**, 2018. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*, Brüssel. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC)

**Flexidao**, 2021. *Case study Microsoft* [Online] Verfügbar unter: <https://www.flexidao.com/case-studies/microsoft> [Zugriff 01.12.2021]

**GGV Energie**, 2021. *Standard-Lastprofile* [Online] Verfügbar unter: <https://www.ggv-energie.de/cms/netz/allgemeine-daten/netzbilanzierung-standard-lastprofile-slp.php> [Zugriff am 21.12.2021]

**Google**, 2021. *Operating on 24/7 Carbon Free Energy by 2030* [Online] Verfügbar unter: <https://sustainability.google/progress/energy/> [Zugriff am 17.12.2021]

**Hamburg Institut**, 2021. *Entwertung von Herkunftsnachweisen für die Verlustenergie von Netzbetreibern*. [Online] Verfügbar unter: [https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/10/HIC\\_2021\\_HKN-fuer-Verlustenergie\\_Marktanalyse\\_final.pdf](https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/10/HIC_2021_HKN-fuer-Verlustenergie_Marktanalyse_final.pdf) [Zugriff am 15.12.2021]

**Lumenaza**, 2021. [Online] Verfügbar unter: <https://lumenaza.de/de/blog/outlook/> [Zugriff am 17.12.2021]

**Montel**, 2021. *Regjeringen vil trekke Norge ut av GO-markedet*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.montelnews.com/no/news/1264244/regjeringen-vil-trekke-norge-ut-av-go-markedet> [Zugriff am 18.12.2021]

**Nord Pool**, 2021. *Nord Pool and Granular - exploring renewable hourly certificates*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.nordpoolgroup.com/trading/nord-pool-and-granular-exploring-renewable-hourly-certificates/> [Zugriff am 17.12.2021]

**SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP**, 2021. *Koalitionsvertrag*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/a4ceb7591c8d9058b402f0a655f7305b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1> [Zugriff am 17.12.2021]

**Stromnetz Berlin**, 2021. *Standard-Lastprofil Haushalt 2021*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.stromnetz.berlin/globalassets/dokumente/netz-nutzen/lastprofil/standardlastprofil-haushalt-2021.xlsx> [Zugriff am 21.12.2021]

**Umweltbundesamt**, 2019. *Marktanalyse Ökostrom II*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-15\\_cc\\_30-2019\\_marktanalyse\\_oekostrom\\_ii.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-15_cc_30-2019_marktanalyse_oekostrom_ii.pdf)

**White House**, 2021. *FACT SHEET: President Biden Signs Executive Order Catalyzing America's Clean Energy Economy Through Federal Sustainability*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/12/08/fact-sheet-president-biden-signs-executive-order-catalyzing-americas-clean-energy-economy-through-federal-sustainability/> [Zugriff am 17.12.2021]