



SAPB

 **Fraunhofer**
FIT

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Institutsteil Wirtschaftsinformatik,
Fraunhofer-Institut für Angewandte
Informationstechnik FIT

Granulare Herkunfts nachweise für Deutschland

**Analyse und Entwicklung eines
Transformationspfads**

Inhalt

Management Summary	5
1. Einleitung.....	7
1.1 Definition und Relevanz granularer HKN	7
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise der Studie.....	8
2. Analyse des bestehenden HKN-Systems in Deutschland	9
2.1 Funktionsweise und Struktur des aktuellen HKN-Systems	9
2.2 Folgen der Ausgestaltung des aktuellen HKN-Systems	10
2.2.1 Fehlende Anreizwirkung für Flexibilitätsoptionen	10
2.2.2 Verlust an Glaubwürdigkeit von Grünstrom.....	12
2.2.3 Kosten durch fehlende Ende-zu-Ende Digitalisierung	12
2.3 Perspektiven zentraler Stakeholder-Gruppen.....	13
2.3.1 Stromanbieter	14
2.3.2 Stromnachfrager.....	14
2.3.3 Politik und Regulierung.....	15
2.3.4 Gesellschaft und Umwelt	15
3. Konzept eines granularen HKN-Systems	16
3.1 Zeitliche und räumliche Granularität	16
3.2 Internationale Vergleichsperspektiven.....	17
3.3 Potenzielle Ausgestaltung granularer HKN für Deutschland	19
3.3.1 Zielbild für granulare HKN.....	19
3.3.2 Preismodelle und Anreizwirkungen	20
3.3.3 Zertifikatsdesign	21
3.3.4 Register und Governance	21
4. Anpassungsbedarfe und Transformationspfad	22
4.1 Technische Anpassungsbedarfe	22
4.2 Regulatorische Anpassungsbedarfe	23
4.3 Transformationspfad zu granularen HKN	25
5. Stakeholder und Nutzenargumentation	27
5.1 Stromanbieter.....	27
5.2 Stromnachfrager	28

5.3 Politik und Regulierung	29
5.4 Gesellschaft und Umwelt	31
6. Fazit	32
Anhang A: Abbildungen der Bedienmaske des HKNR	34
Anhang B: Weiterführende Reformvorschläge	35
Anhang C: Übersicht der Nutzenargumentation	36
Literaturverzeichnis	40

Über das Scientific Advisory & Project Board

Die vorliegende Kurzstudie wurde von einem Konsortium entwickelt, das sich aus Mitgliedern des 50Hertz Scientific Advisory and Project Boards (SAPB) zusammensetzt. Das SAPB ist ein Kreis von Professorinnen und Professoren, die 50Hertz darin unterstützen, neue Denk- und Lösungsansätze zu entwickeln und Erkenntnisse aus der Forschung – wo angemessen – in die Praxis von 50Hertz zu übernehmen.

Disclaimer 50Hertz

Im Kontext der durch 50Hertz beauftragten SAPB-Studien forschen die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler frei und ergebnisoffen. Alle entwickelten Handlungsempfehlungen werden von 50Hertz eingehend geprüft und diskutiert, letztendlich entsprechen aber nicht alle Positionen denen von 50Hertz.

Disclaimer Fraunhofer FIT

Dieses Whitepaper wurde durch das Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT nach bestem Wissen und unter Einhaltung der nötigen Sorgfalt erstellt. Die beteiligten Institutionen, gesetzliche Vertreterinnen und Vertreter und/oder Erfüllungsgehilfinnen und Erfüllungsgehilfen übernehmen keinerlei Garantie dafür, dass die Inhalte dieses Diskussionspapiers gesichert, vollständig für bestimmte Zwecke brauchbar oder in sonstiger Weise frei von Fehlern sind. Die Nutzung dieses Whitepapers geschieht ausschließlich auf eigene Verantwortung. In keinem Fall haften die beteiligten Institutionen, gesetzliche Vertreterinnen und Vertreter und/oder Erfüllungsgehilfinnen und Erfüllungsgehilfen für jegliche Schäden, seien sie mittelbar oder unmittelbar, die aus der Nutzung des Whitepapers resultieren.

Bildquelle

Das Titelbild wurde mit dem KI-Bildgenerator von Perplexity AI erstellt.

Autoren

Prof. Dr. Jens Strüker, Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Prof. Dr. Andreas Löschel, Ruhr-Universität Bochum

Michael Schneider, Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Tobias Ströher, Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Management Summary

Das bestehende deutsche Herkunfts-nachweis- (HKN-) System erfüllt die derzeitigen gesetzlichen nationalen und europarechtlichen Anforderungen an die Nachweisführung von Grünstromprodukten, sollte jedoch u. a. aufgrund der zeitlichen und räumlichen Entkopplung zwischen Erzeugung und Verbrauch sowie fehlender ökonomischer Anreize für einen zielgerichteten Ausbau erneuerbarer Energien (EE) dringend weiterentwickelt werden. Granulare HKN stellen hierbei einen wirkungsvollen Lösungsansatz dar.

Geringe systemische Effizienz in der Energiewende in Deutschland durch importierte, nicht-granulare HKN

Das aktuelle deutsche HKN-System weist vier kritische Schwachstellen auf:

- Die zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch ermöglicht es, Strommengen bilanziell über Zeiträume von bis zu 18 Monaten auszugleichen, ohne dass die physikalische Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch gewährleistet sein muss.
- Die räumliche Entkopplung erlaubt einerseits einen europaweiten Handel, andererseits bleiben entsprechend physische Stromflüsse oder Netzrestriktionen hierbei unberücksichtigt.
- Die zeitliche und räumliche Entkopplung verhindert die Herausbildung von Präferenzen für lokalen und grünen Strom.
- Die fehlende Ende-zu-Ende-Digitalisierung verursacht einen hohen administrativen Aufwand und ist nicht zukunftsfähig im Hinblick auf die in der RED III geforderte höhere Granularität der HKN.

Durch den derzeit verbreiteten Erwerb günstiger, nicht-granularer HKN aus dem Ausland (z. B. Norwegen) fließt im aktuellen System Kapital ab, ohne dass daraus wirksame ökonomische Anreize für zusätzlichen und effizienten EE-Ausbau in Deutschland oder Europa entstehen. Diese importierten, nicht-granularen HKN ermöglichen zwar eine rechnerische „Grünstellung“ von Stromnachfragern, setzen jedoch keine marktwirksamen Investitions- oder Preissignale, die zu effizienteren oder flexibleren Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen führen würden. Das gegenwärtige System ist daher systemisch ineffizient, da die Entkoppelung von Ökonomie und Physik zu nicht zielgerichteten Investitionen führt: Der regionale, flexible EE-Ausbau wird nicht gefördert, sondern sogar tendenziell gehemmt. Es wird kein Beitrag zur tatsächlichen Dekarbonisierung oder zur Effizienzsteigerung des europäischen Energiesystems geleistet.

Granulare HKN als zentrales, transparentes Instrument zur zielgerichteten Koordinierung der Energiewende

Granulare HKN ermöglichen durch höhere zeitliche und räumliche Granularität eine präzisere Abbildung von Erzeugung und Verbrauch. Dies stärkt das Vertrauen von Verbraucher*innen und Unternehmen in den Beitrag von Grünstromprodukten zur Dekarbonisierung und erlaubt es, lokale und grüne Präferenzen zu bedienen. Gleichzeitig bieten granulare HKN auch politisch einen entscheidenden Vorteil: Maßnahmen, Förderprogramme oder Berichtsanforderungen, deren positive Wirkung durch sie nachvollziehbar und belastbar belegt werden kann, sind wesentlich weniger angreifbar für Greenwashing-Vorwürfe.

Granulare HKN setzen darüber hinaus mittels Preissignale gezielte Investitionsanreize für EE-Ausbau und flexiblen Verbrauch – insbesondere in Regionen mit bislang unzureichender EE-Erzeugung oder Flexibilitätspotenzialen. Dadurch fördern sie die effiziente Integration von EE und senken potenziell die Systemkosten durch geringeren Redispatch- und Netzausbaubedarf und belohnen Unternehmen, die bereits heute schon in Energieflexibilität investieren. Damit werden granulare HKN zu einem hochwirksamen, marktbasierter Koordinierungsinstrument für die Energiewende. Durch die Fähigkeit, konkrete Informationen zur Herkunft des Stroms (z. B. CO₂-Intensität) auszuweisen, ermöglichen granulare HKN auch zielgerichteter politische Maßnahmen als das aktuelle HKN-System, welches nur Entscheidungen zwischen „grün“ und „nicht grün“ zulässt. Granulare HKN können perspektivisch zunehmend ineffiziente, veraltete und komplexe Instrumente ablösen und zugleich belastbare und transparente Informationen bereitstellen, die entsprechend auch im Hinblick auf die Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen für Banken und Investoren zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Ein langfristiger Transformationspfad steigert Planungssicherheit und Akzeptanz granularer HKN

Politische Entscheidungsträger sollten einen klaren, langfristigen Transformationspfad zur stärkeren Durchdringung granularer HKN aufzeigen. Die daraus resultierende Planungssicherheit bietet die Grundlage für dringend benötigte Investitionen in netzdienliche Erzeugung und flexiblen Verbrauch auf freiwilliger Basis. Um die Durchdringung granularer HKN zu erhöhen, gilt es, bestehende positive Anreize zur Verwendung granularer HKN beispielsweise aufgrund von entsprechenden Präferenzen für lokalen, grünen Strom weiter auszubauen und ihre Nutzung mit etablierten Instrumenten wie individuellen Netzentgelten oder der THG-Quote zu verknüpfen.

Technisch ist eine flächendeckende Ausstattung mit Smart Metern erforderlich, die Erzeugung und Verbrauch in kurzen Intervallen erfassen. Das Herkunftsnnachweisregister müsste zudem zur Verarbeitung hochauflöster Zeitstempel und räumlicher Zuordnungen weiterentwickelt werden. Auch eine Kopplung mit dem Marktstammdatenregister ist empfehlenswert, da z. B. durch eine vereinheitlichte Registrierung von Energieanlagen (sog. Onboarding) Prozesse beschleunigt und somit zusätzlich Systemkosten gesenkt werden können. Mit einem klaren, langfristigen Transformationspfad – sowohl regulatorisch als auch technisch – schaffen Politik und Regulierung gemeinsam die notwendige Planungssicherheit, um granulare HKN tatsächlich zu einem zentralen, marktbasierter Koordinierungsinstrument der deutschen Energiewende zu machen.

1. Einleitung

Um die Erderwärmung auf unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen, ist eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen erforderlich (IPCC 2023). Der Großteil der weltweiten Treibhausgasemissionen entfällt dabei auf die Energiewirtschaft (IEA 2023), womit der Dekarbonisierung des Energiesektors eine Schlüsselrolle zukommt. Als größte Volkswirtschaft und größter Stromverbraucher in der Europäischen Union (EU) setzt Deutschland im Rahmen der Energiewende daher insbesondere auf den Ausbau erneuerbarer Energien. Herkunftsachweise (HKN) können hierbei eine zentrale Rolle einnehmen: Sie kennzeichnen und ermöglichen den Handel von Grünstrom, schaffen Transparenz für Verbraucher und setzen Anreize für den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien (UBA 2025). Granulare HKN weisen dabei Grünstrom mit einer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung aus. Dadurch können sie die Nachvollziehbarkeit von Stromherkunft und -nutzung verbessern, Greenwashing vorbeugen und gezieltere Investitions- sowie Verbrauchsanreize im Sinne einer zielgerichteten Energiewende schaffen.

Der Aufbau dieser Studie gliedert sich wie folgt: Kapitel 1 beschreibt Relevanz, Zielsetzung und methodisches Vorgehen. Kapitel 2 analysiert das bestehende HKN-System in Deutschland, indem es zunächst Funktionsweise und Struktur darstellt, anschließend Grenzen und Herausforderungen der aktuellen Ausgestaltung sowie die Perspektiven zentraler Stakeholdergruppen untersucht. Kapitel 3 entwickelt darauf aufbauend ein Konzept für ein granular ausgestaltetes HKN-System, das zeitliche und räumliche Dimensionen berücksichtigt, internationale Vergleichsperspektiven einbezieht und ein mögliches Zielbild für Deutschland skizziert. Kapitel 4 diskutiert die regulatorischen und technischen Voraussetzungen sowie einen Transformationspfad für die Einführung granularer HKN. Kapitel 5 vertieft die Nutzenargumentation aus Sicht der betreffenden Stakeholder aus Kapitel 2. Abschließend fasst Kapitel 6 die zentralen Ergebnisse zusammen und leitet Handlungsempfehlungen ab.

1.1 Definition und Relevanz granularer HKN

Ein HKN ist ein elektronisches Dokument, das bestätigt, dass eine bestimmte Strommenge aus erneuerbaren Energien erzeugt und in das europäische Stromnetz eingespeist wurde (UBA 2025). Die Ausstellung von HKN erfolgt in Deutschland durch das Herkunftsachweisregister (HKNR), das beim Umweltbundesamt (UBA) gemäß Artikel 19 der EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien angesiedelt ist. Das deutsche HKNR ist durch die sogenannte Association of Issuing Bodies (AIB) mit anderen europäischen HKN-Systemen kompatibel, indem ein umfassender Qualitätsstandard („EECS Rules“) und eine Datenschnittstelle („AIB Hub“) bereitgestellt werden. Dadurch ist der Import und Export von HKN innerhalb der EU möglich (UBA 2019).

Das bestehende HKN-System in Deutschland ist ein etabliertes Instrument zur Kennzeichnung von Strom aus erneuerbaren Energien. Es dient dazu, Stromverbraucher*innen, Behörden und weiteren Markakteuren Transparenz über die Herkunft des verbrauchten Stroms zu bieten. Grundlage für das deutsche HKN-System sind die Vorgaben des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) sowie die EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien (RED II und deren weiterentwickelte Fassung RED III), die den Einsatz von HKN europaweit regelt (Europäische Kommission 2023).

Das deutsche HKN-System ist rechtlich und organisatorisch stabil und hat sich über zwei Jahrzehnte als förderlich für den Ausbau erneuerbarer Energien erwiesen, stößt jedoch in der heutigen Praxis zunehmend an seine Grenzen: Obwohl es Anreize für den quantitativen Zubau erneuerbarer Energien setzt, etwa indem Stromverbraucher*innen mit ihrer Nachfrage nach Grünstromtarifen Investitionsanreize in erneuerbare Energien setzen, bleiben Einschränkungen und Erfordernisse im physischen Stromnetz wie Netzrestriktionen und die Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch unberücksichtigt. Dadurch fehlen u. a. ökonomische Anreize für einen geografisch zielgerichteten Ausbau erneuerbarer Energien, welche die physikalischen Bedingungen des Energiesystems berücksichtigen. Eine mögliche Lösung für diese strukturellen Defizite liegt in der Implementierung granularer HKN-Systeme, die zeitliche und räumliche Dimensionen der Stromerzeugung und -nachfrage präziser abbilden können und somit ökonomische Signale mit den physikalischen Realitäten des Stromnetzes verbinden. Zudem führt die unzureichende Digitalisierung des HKN-Systems zu einem sehr hohen bürokratischen Aufwand hinsichtlich der Nutzung, des Betriebs sowie der Pflege des HKNR, welches die Infrastruktur für deutsche HKN darstellt (UBA 2025). Entsprechend werden im Rahmen dieser Studie folgende Kritikpunkte in Bezug auf das aktuelle deutsche HKN-System identifiziert: Die zeitliche und räumliche Entkopplung von Stromerzeugung und -verbrauch sowie eine fehlende Ende-zu-Ende Digitalisierung (s. Kapitel 2).

Granulare HKN – in Kombination mit einer Ende-zu-Ende Digitalisierung des HKN-Systems – bieten Lösungsansätze für diese Kritikpunkte: Eine höhere zeitliche und/oder räumliche Granularität kann nicht nur eine Verbesserung der Markttransparenz bedeuten, sondern auch die Dekarbonisierung des Energiesystems beschleunigen (Riepin und Brown 2024). Finanzielle Anreize würden durch entsprechende Preissignale Investitionen in erneuerbare Energien, Speicher und Nachfrageflexibilität gezielt anreizen, was die effiziente und zielgerichtete Integration erneuerbarer Energien erleichtert und Systemkosten insgesamt senkt.

Internationale Entwicklungen zeigen bereits erste Bestrebungen in Richtung solcher granularer Nachweissysteme und einer Ende-zu-Ende Digitalisierung. Initiativen wie Energy Track and Trace (2022) von 50Hertz und Elia in Kooperation mit Granular Energy (2024a, 2024b) belegen dabei die technische Machbarkeit. Mit Initiativen wie EnergyTag (2023, 2025) werden zudem eine digitale Infrastruktur sowie Standards für die Ausstellung und den Handel von granularen HKN entwickelt, die unter anderem von großen Netzbetreibern, Energieversorgungsunternehmen (EVU) und Technologieanbietern unterstützt werden (24/7 Hub 2023; ESB 2024).

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise der Studie

Diese Studie verfolgt vier zentrale Ziele:

- 1) Analyse des bestehenden HKN-Systems in Deutschland, inklusive der Darstellung der Funktionsweise sowie bestehender Herausforderungen und Perspektiven relevanter Stakeholdergruppen
- 2) Identifizierung eines technisch und organisatorisch tragfähigen Konzepts für granulare HKN, unter Berücksichtigung von (inter-)nationalen Pilotprojekten, Erfahrungen und Best Practices
- 3) Aufzeigen des volks- und betriebswirtschaftlichen Mehrwerts zeitlich und räumlich granularer HKN aus Sicht verschiedener Stakeholdergruppen

- 4) Entwurf eines Transformationspfades, der die technischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für die Einführung granularer HKN beschreibt.

Die Inhalte der Studie wurden mittels einer qualitativen Literaturrecherche und Experteninterviews erarbeitet. Berücksichtigt wurden dabei nationale und internationale Fachliteratur, Dokumente zur geltenden Regulatorik, Pilotprojektberichte sowie wissenschaftliche Analysen. Die Quellenauswahl erfolgte nach den Kriterien der Relevanz, Aktualität und Nachprüfbarkeit. Es wurden ausschließlich öffentlich zugängliche Quellen herangezogen.

2. Analyse des bestehenden HKN-Systems in Deutschland

Kapitel 2 widmet sich der Analyse des bestehenden HKN-Systems in Deutschland. Zunächst wird dessen Funktionsweise und institutionelle Struktur beschrieben, um die Rolle von HKN innerhalb der nationalen und europäischen Regulierung einzuordnen. Darauf aufbauend werden zentrale Grenzen und Herausforderungen der aktuellen Ausgestaltung aufgezeigt, insbesondere im Hinblick auf zeitliche und räumliche Granularität, den Stand der Digitalisierung des HKNRs sowie die fehlende Anreizwirkung für eine effiziente Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem. Anschließend werden die Perspektiven der zentralen Stakeholder-Gruppen dargestellt, um ein differenziertes Bild der Debatte und der unterschiedlichen Positionen im Hinblick auf eine Weiterentwicklung des HKN-Systems zu vermitteln.

2.1 Funktionsweise und Struktur des aktuellen HKN-Systems

Die Grundlage für die Ausstellung von HKN bildet eine durch den zuständigen Netzbetreiber bestätigte Erzeugungsmenge aus sonstiger Direktvermarktung (§ 21a EEG 2023). Pro erzeugter Megawattstunde (MWh) aus erneuerbaren Energien wird ein HKN ausgestellt. Das sogenannte Doppelvermarktungsverbot (§ 80 EEG 2023) stellt dabei sicher, dass die erneuerbare Eigenschaft von Strom nur einmal genutzt wird, weshalb ein HKN nur für ungeförderter Strom nach dem EEG ausgestellt werden kann (UBA 2025). Wird ein HKN entwertet, darf umgekehrt derselbe „grüne“ Strom nicht zusätzlich über andere Instrumente wie EEG-Förderung oder CO₂-Zertifikate als klimafreundlich ausgewiesen werden.

In der Praxis ist dabei zwischen physikalischem Stromfluss und Bilanzierung zu unterscheiden: Physikalisch fließt der eingespeiste Strom gemäß der Kirchhoffschen Gesetze und in Abhängigkeit bestehender Netzrestriktionen im Stromnetz und kann nur annäherungsweise einem bestimmten Endverbraucher zugeordnet werden. Bilanziell hingegen wird Grünstrom über HKN separat dokumentiert, gehandelt und auf die Stromkennzeichnung der EVU übertragen (Körner et al. 2024). Auf diese Weise kann ein EVU konventionellen Strom physikalisch beziehen, diesen aber bilanziell durch den Erwerb von HKN als „Grünstrom“ ausweisen.

Der Prozess der HKN-Ausstellung gliedert sich in folgende Schritte, die vereinfacht in Abbildung 1 dargestellt sind: Das UBA stellt im HKNR dem Anlagenbetreiber für die erzeugte Strommenge einen HKN in elektronischer Form aus und schreibt sie dem Anlagenbetreiberkonto gut (UBA 2019). Diese HKN können dann zwischen Marktteilnehmern über Händler gehandelt und an EVU übertragen werden. Die Übertragung der HKN erfolgt parallel innerhalb des HKNR. Zur Stromkennzeichnung gegenüber Stromverbraucher*innen werden die HKN durch das jeweilige EVU im HKNR entwertet, wodurch sie nicht weiter handelbar sind.

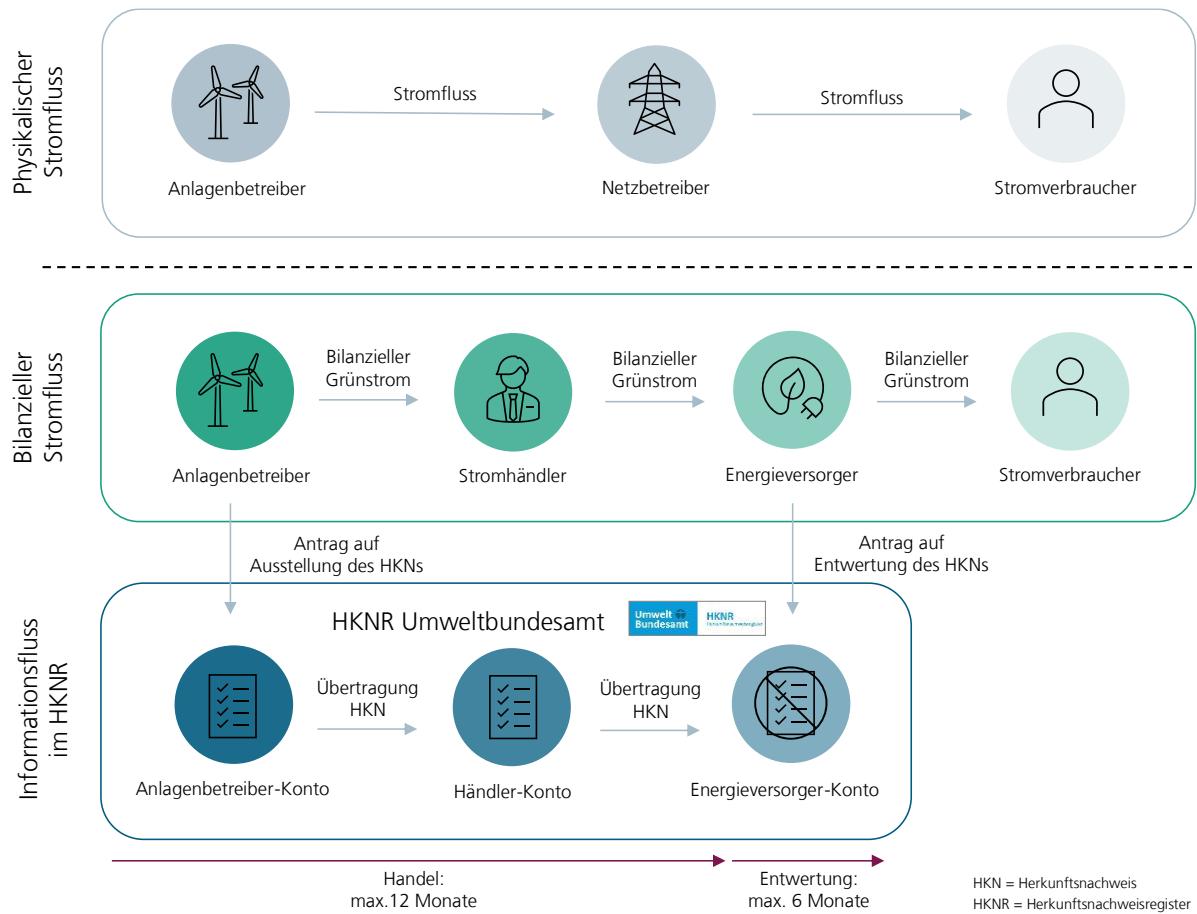


Abbildung 1: Physikalischer und bilanzieller Stromfluss von (Grün-)Strom. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an FÖS (2025) und UBA (2025)

Nach Ausstellung haben HKN eine Gesamtgeltungsdauer von 18 Monaten, wovon sie 12 Monate frei per Handel übertragbar sind („jährliche Bilanzierung“). Das heißt, nach 12 Monaten müssen HKN auf dem entsprechenden HKN-Konto des EVU liegen und können nur noch zur Entwertung genutzt werden (UBA 2025). Das EVU nutzt schließlich HKN, um Strom gegenüber den Stromverbraucher*innen als Grünstrom zu kennzeichnen.

2.2 Folgen der Ausgestaltung des aktuellen HKN-Systems

Die aktuelle Ausgestaltung des deutschen HKN-Systems weist Grenzen auf, welche die Effektivität von HKN im Kontext des aktuellen Standes der Energiewende zunehmend einschränken. Diese Grenzen werden im Folgenden näher beleuchtet.

2.2.1 Fehlende Anreizwirkung für Flexibilitätsoptionen

Durch die jährliche Bilanzierung können Erzeugung und Verbrauch zeitlich stark voneinander abweichen (vgl. Kapitel 1.1). Beispielsweise kann ein Unternehmen HKN aus im August erzeugtem PV-Strom verwenden, um seinen im Dezember verbrauchten Strom als „grün“ zu bescheinigen (Körner et al. 2025). In der Praxis bedeutet das: HKN spiegeln zwar die Herkunft des Stroms wider, aber nicht den Zeitpunkt, zu dem er tatsächlich ins Netz eingespeist oder verbraucht wurde.

Zudem können HKN derzeit europaweit gehandelt werden, unabhängig von physischen Stromflüssen oder Netzrestriktionen (räumliche Entkopplung, vgl. Kapitel 1.1). Beispielsweise

können deutsche Stromverbraucher*innen HKN aus Norwegen erwerben. Da dort aufgrund des hohen Anteils erneuerbarer Energien am Strommix auf dem heimischen Markt kaum Nachfrage nach HKN besteht, werden die HKN als Nebenprodukt der Stromerzeugung günstig nach Deutschland verkauft, obwohl aufgrund bestehender Netzrestriktionen nur eingeschränkter Stromfluss zwischen den Ländern besteht. Dadurch profitieren vor allem Betreiber abgeschriebener Wasserkraftanlagen in Norwegen durch sogenannte Windfall Profits, während die Einnahmen aus dem HKN-Handel nicht in die Finanzierung der Energiewende in Deutschland fließen. Für die in Deutschland notwendige Transformation des Energiesystems gehen somit wichtige Mittel verloren. Dieses Auseinanderfallen von Handelsflüssen und physikalischer Realität führt zu einer systemischen Ineffizienz, da Kapitalströme nicht dort wirken, wo sie aus energiewirtschaftlicher Sicht den größten Zusatznutzen entfalten könnten. Auch innerhalb Deutschlands ist das Problem der Windfall Profits – bspw. durch die hohe Einspeisung erneuerbarer Energien in Norddeutschland (v.a. aufgrund von Windkraft) und dem hohen Verbrauch in Süddeutschland (v.a. aufgrund der energieintensiven Industrie) – gegeben. Dadurch fehlen zeitabhängige, lokale Preissignale, die Anreize für eine netzdienliche Erzeugung und einen flexiblen Verbrauch setzen würden. In einem granular ausgestalteten System könnten HKN hingegen in kürzeren Intervallen – etwa stündlich oder viertelstündlich – ausgestellt werden und jeweils den realen Erzeugungs- und Verbrauchszeitpunkten zugeordnet sein. Dies würde die systemische Effizienz im europäischen Energiesystem erhöhen, da die Preissignale räumlich und zeitlich präziser wirken und somit die Allokation von Erzeugung, Verbrauch und Flexibilität verbessern könnten. Auf dieser Basis ließen sich zeitabhängige, lokale Preissignale entwickeln, die Strom aus erneuerbaren Energien in Zeiten von Knappheit (z. B. abendliche Dunkelflauten im Winter) höher bepreisen und in Zeiten hoher Verfügbarkeit (z. B. sonnige Mittagsstunden im Sommer) günstiger machen (Energy Track and Trace 2022; FÖS 2025; Riepin und Brown 2024).

Solche Preissignale schaffen Anreize für flexibles Verhalten: Auf Verbrauchsseite können Haushalte und Unternehmen ihren Strombedarf verstärkt in Zeiten hoher Einspeisung aus erneuerbaren Energien verlagern, etwa durch das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen, den Betrieb von Wärmepumpen oder die flexible Nutzung industrieller Lasten. Gleichzeitig entstehen für Erzeuger Anreize, ihre Anlagen so auszulegen oder zu betreiben, dass sie in Zeiten hoher Nachfrage zusätzlichen erneuerbaren Strom bereitstellen können, beispielsweise durch Speicherintegration oder flexible Betriebsstrategien. So könnten HKN künftig nicht nur als Nachweis über die Herkunft von Grünstrom dienen, sondern als marktliches Koordinierungsinstrument, das eine effiziente Nutzung erneuerbarer Energien fördert und damit sowohl die Integration schwankender Einspeisung aus erneuerbaren Energien erleichtert als auch Kosten für Redispatch (Maßnahmen zur Steuerung von Anlagen, um Netzengpässe zu vermeiden oder zu beseitigen) und Netzausbau senken kann. Das aktuelle Diskussionspapier der BNetzA (2025) zur Weiterentwicklung der Entgelte für Industrie und Gewerbe hebt beispielhaft den Beitrag von Energieflexibilität zur Abmilderung steigender Redispatch-Kosten hervor.

2.2.2 Verlust an Glaubwürdigkeit von Grünstrom

Für Verbraucher*innen ist im aktuellen HKN-System kaum nachvollziehbar, wann und wo ihr Strom tatsächlich erzeugt wurde. Dies mindert die Aussagekraft der HKN und erschwert eine transparente

Stromkennzeichnung. Die aktuelle Ausgestaltung kann Spielräume für Greenwashing eröffnen, wenn Stromprodukte als „grün“ vermarktet werden, ohne dass physikalisch eine entsprechende Deckung

vorhanden ist (FÖS 2025). Dies betrifft insbesondere Fälle, in denen erneuerbar erzeugter Strom zwar über HKN als Grünstrom ausgewiesen wird, tatsächlich jedoch aufgrund von Netzrestriktionen vor Ort abgeregelt werden muss, während an anderer Stelle ein fossiles Kraftwerk zur Netzstabilisierung genutzt wird. In solchen Situationen entsprechen die gehandelten HKN-Mengen nicht mehr der tatsächlich aus dem Netz verbrauchten Menge an Grünstrom. Daher fordern auch Investoren und Unternehmen granulare HKN, um potenziellen Greenwashing-Vorwürfen effektiv begegnen zu können. In der Konsequenz können HKN in ihrer derzeitigen Form die Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten eher unterminieren. Sie bieten weder EVU noch Verbraucher*innen eine verlässliche Orientierung und tragen bislang nur begrenzt dazu bei, die Energiewende transparent und wirksam zu koordinieren.

Greenwashing im Strommarkt

Unter Greenwashing versteht man die bewusste oder unbewusste Erzeugung eines umweltfreundlichen Images, ohne dass tatsächlich umweltfreundliche Maßnahmen (im suggerierten Umfang) getroffen werden. Im Strommarkt tritt dieses Phänomen häufig auf, wenn Unternehmen übermäßig mit „grünem Strom“ werben, der lediglich durch HKN bilanziell belegt wird, während physikalisch weiterhin CO₂-intensiver Strom aus dem deutschen Strommix verbraucht wird und keinerlei weitere Maßnahmen zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks getätigt werden, da die HKN auch so generiert wurden.

2.2.3 Kosten durch fehlende Ende-zu-Ende Digitalisierung

Ein weiteres strukturelles Defizit der aktuellen Ausgestaltung des deutschen HKN-Systems liegt in der mangelnden Digitalisierung. Viele Prozessschritte erfordern manuelle Eingaben und Abstimmungen unter anderem zwischen Anlagenbetreibern, Stromlieferanten, EVUs und dem UBA. Dies verursacht hohen administrativen Aufwand, ist fehleranfällig und führt zu Verzögerungen. Besonders deutlich wird dies beim Entwertungsprozess: Um einen Entwertungsnachweis im HKNR erstellen zu können, müssen die Felder „Stromkunde“ und „Stromprodukt“ zunächst identisch befüllt sein. Erst dann kann durch Auswahl der entsprechenden Schaltfläche der Entwertungsnachweis erzeugt werden. Das UBA weist jedoch darauf hin, dass bei größeren Datenmengen die Erstellung fehlschlagen kann. In solchen Fällen müssen die Entwertungen mit Filtern (z. B. nach Produktionsmonat oder Anlage) in Teilmengen stückweise durchgeführt werden – ein Vorgehen, das den administrativen Aufwand erheblich steigert und mit zunehmenden Datenmengen nicht skaliert (UBA 2025).

Ähnlich aufwendig stellt sich auch der Prozess zur Übertragung von HKN dar: Nach der Kurzanleitung des UBA (2023) umfasst ein einzelner Transfer mehrere aufeinanderfolgende Schritte, von der manuellen Suche nach dem Empfängerkonto über das Befüllen verschiedener Pflichtfelder („Produktionsmonat von/bis“, „Anzeigelayout auswählen“), die Eingabe der zu

transferierenden Mengen und optionaler Transfertexte bis hin zur TAN-Authentifizierung per Mobiltelefon. Eingabefehler führen dazu, dass Vorgänge abgebrochen werden müssen. Falsch adressierte Transfers können zudem nicht durch die Registerverwaltung korrigiert werden, sondern erfordern direkte Abstimmungen zwischen den beteiligten Marktakteuren. Die Abbildungen in Anhang A veranschaulichen den Prozess der Übertragung von HKN im HKNR.

Eine Ende-zu-Ende digitalisierte Abwicklung des Prozesses von der Erzeugung bis zur Entwertung eines HKN würde den Betrieb des HKNR deutlich effizienter gestalten, die Datenqualität signifikant verbessern und Transparenz für alle beteiligten Marktakteure erhöhen. Damit ließen sich nicht nur Bürokratiekosten senken, sondern auch die Glaubwürdigkeit des Systems insgesamt stärken. Darüber hinaus skaliert das aktuelle, nur teilweise digitalisierte, System nicht für granulare Systeme: Würde man im Zusammenhang mit einer höheren Auflösung bspw. die Strommenge eines HKN von 1 MWh auf 1 Kilowattstunde (kWh) senken, so würde sich die Anzahl der ausgestellten, gehandelten und zu entwertenden Zertifikate um den Faktor 1.000 erhöhen – eine Erhöhung, die im aktuellen System kaum handhabbar scheint. Diese oder eine noch höhere Auflösung wird jedoch für die Flexibilisierung der Energiewende mit Blick auf RED III auch für Deutschland zunehmend erforderlich und erwartbar.

Durch eine konsequente Ende-zu-Ende-Digitalisierung im Energiesystem könnten Prozesse (beispielsweise von der Registrierung und flexiblen Nutzung der Anlagen auf unterschiedlichen Vermarktungsformen über die Maximierung des Eigenverbrauchs bis hin zur Entwertung der zugrundeliegenden HKN) deutlich beschleunigt werden. Zugleich würden sich Synergien zwischen bestehenden Registern wie dem Marktstammdatenregister (MaStR) und dem HKNR erschließen, sodass durch eine bessere Skalierbarkeit zusätzliche Effizienzgewinne und Kosteneinsparungen im Energiesystem realisiert werden könnten. So könnte eine automatisierte Weitergabe von digitalen Anlagen-Stammdaten vom MaStR an das HKNR beispielsweise den Ausstellungsprozess von HKN vereinfachen, indem diese Daten in letzterem nicht mehr redundant erhoben und geprüft werden müssen (dena 2025). Zudem kann dadurch das HKNR mit Registern für weiterführende HKN gekoppelt werden, die nach RED III strenge Anforderungen an die Nachweisbarkeit der Herkunft des zugrundeliegenden Stroms stellen. Beispielsweise sollten die kommenden Herkunfts-nachweisregister für Wärme und Kälte sowie für Gase mit dem HKNR synchronisiert sein, sodass Strom aus erneuerbaren Energien zur Erzeugung von Wasserstoff und Wärme effizient nachgewiesen und mehrfache Anrechnung vermieden werden kann.

2.3 Perspektiven zentraler Stakeholder-Gruppen

Die Weiterentwicklung des HKN-Systems betrifft eine Vielzahl von Akteuren mit unterschiedlichen Rollen, Interessen und Einflussmöglichkeiten. Um die Diskussion des Mehrwerts granularer HKN (siehe Kapitel 5) einordnen zu können, ist es zunächst notwendig, die zentralen Stakeholdergruppen und ihre jeweiligen Perspektiven gegenüber dem bestehenden HKN-System zu verstehen. Dabei werden in dieser Studie vier übergeordnete Perspektiven unterschieden: *Stromanbieter*, *Stromnachfrager*, *Politik und Regulierung* sowie *Gesellschaft und Umwelt*. Diese Gruppierung dient der Vereinfachung sowie der analytischen Strukturierung der Studie; sie ist weder abschließend noch sind die Perspektiven homogen, da innerhalb jeder Gruppe und innerhalb der genannten Stakeholder unterschiedliche Perspektiven und Interessen bestehen können. Stakeholder wie Netzbetreiber, Technologiepartner (z. B. node.energy oder Granular

Energy) oder Zertifizierer (z. B. TÜV Süd oder DEKRA) werden in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

2.3.1 Stromanbieter

Zur Gruppe der Stromanbieter gehören gemeinhin *Anlagenbetreiber*, *Stromhändler* und *EVUs*. Diese Stakeholdergruppe bildet die Angebotsseite des HKN-Systems und verfolgt überwiegend wirtschaftliche Interessen. Für *Anlagenbetreiber* stellen HKN ein zentrales Instrument zur Dokumentation und Monetarisierung der aus erneuerbaren Energien erzeugten Strommengen dar. Sie können durch den Verkauf von HKN zusätzliche Erlöse erzielen. In diesem Sinne sind HKN ein handelbares Gut, das ihre Erzeugung zertifiziert und so den Zugang zu bestimmten Absatzmärkten – etwa zu Anbietern von Grünstromtarifen oder zu Unternehmen mit Nachhaltigkeitsverpflichtungen – eröffnet. *Stromhändler* nutzen HKN vor allem zur Portfoliooptimierung. Sie kaufen und bündeln Zertifikate, um den ökologischen Wert von Stromlieferverträgen nachzuweisen oder Grünstromprodukte für unterschiedliche Kundensegmente zu gestalten.

Dabei ist für sie die internationale Handelbarkeit und Standardisierung von HKN entscheidend, um Arbitragemöglichkeiten nutzen und verschiedene Märkte bedienen zu können. *EVUs* (bspw. Stadtwerke, Direktvermarkter oder Power Purchase Agreement (PPA)-Anbieter) schließlich setzen HKN ein, um ihre Stromkennzeichnung gegenüber Stromverbrauchern zu erfüllen und Grünstromprodukte zu vermarkten. Für sie ist entscheidend, dass HKN glaubwürdig und für Stromverbraucher*innen nachvollziehbar bleiben.

Scope 2 Emissionen

Im Greenhouse Gas Protocol (2023), dem am weitesten verbreiteten Standard zur Bilanzierung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen, werden Emissionen in drei Scopes eingeteilt. Scope 2 umfasst dabei indirekte Emissionen aus Energie (z. B. Strom und Wärme).

Diese Emissionen sollen dabei nach dem Prinzip des „Dual Reporting“ sowohl ortsbasiert als auch marktisiert berichtet werden. Bei letzterem können Emissionen durch HKN grün gestellt werden (Greenhouse Gas Protocol 2023). Zudem wird zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie im Rahmen eines Revisionsprozesses ein stündlicher Abgleich („hourly matching“) der Zertifikate sowie ein stärkerer Zusammenhang zwischen Vertragsinstrumenten und physischem Strombezug („deliverability“) gefordert (Greenhouse Gas Protocol 2025).

2.3.2 Stromnachfrager

Auf der Nachfrageseite agiert eine Vielzahl unterschiedlicher Stakeholder-Gruppen. In dieser Studie legen wir den Fokus auf *Industrieunternehmen* und *private Haushalte*. Für *Industrieunternehmen* sind HKN zunehmend Bestandteil ihrer Nachhaltigkeitsberichterstattung. Im Kontext der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) und der steigenden Relevanz von Scope-2- und Scope-3-Emissionen ermöglichen HKN, den bilanziellen Bezug von erneuerbarem Strom nachzuweisen. Damit dienen sie sowohl der regulatorischen Pflichterfüllung als auch der Kommunikation gegenüber Geschäftspartnern, Investoren und Kund*innen. In Branchen mit hohen Emissionen oder reputationssensitiven Märkten werden HKN so zu einem ökonomischen Faktor, der Marktzugang sichert, Lieferkettenbeziehungen stabilisiert und Wettbewerbsvorteile schaffen kann. Gleichzeitig bleibt der tatsächliche Nutzen für viele

Unternehmen begrenzt: HKN weisen zwar den bilanziellen Anteil erneuerbarer Energien aus, geben aber keine Auskunft über die tatsächliche Klimawirkung des eingesetzten Stroms. Für zahlreiche Industrieunternehmen, insbesondere im Mittelstand, sind HKN daher eher ein Mittel zur Erfüllung externer Berichtspflichten als ein strategisches Koordinierungsinstrument der Energiebeschaffung. Für *Privathaushalte* mit entsprechenden Präferenzen für nachhaltigen Stromverbrauch steht Transparenz hinsichtlich Regionalität und Nachhaltigkeit im Vordergrund (Feldhaus et al. 2022). Die Stromkennzeichnung soll genaue Informationen über den verbrauchten Strom offenlegen (Bengart und Vogt 2021) und damit eindeutig und verständlich vermitteln, ob ihr Stromverbrauch tatsächlich zu einer emissionsarmen Versorgung beiträgt oder lediglich bilanziell „grün“ erscheint.

2.3.3 Politik und Regulierung

Politische Institutionen und Regulierungsbehörden bestimmen die Rahmenbedingungen des HKN-Systems und prägen damit maßgeblich dessen Funktionsweise und Legitimität. Auf europäischer Ebene steht dabei die *EU-Kommission* im Zentrum: Sie ist das Exekutivorgan der EU und kann neue Gesetze vorschlagen sowie Beschlüsse umsetzen. Ihre Perspektive ist stark vom europäischen Binnenmarkt und integrationspolitisch geprägt: Sie verfolgt das Ziel, durch Vorgaben wie die RED III europäische Klimaziele bei gleichzeitiger Harmonisierung der nationalen Systeme zu erreichen und dadurch unter anderem den grenzüberschreitenden Handel mit HKN zu erleichtern. Gleichzeitig achtet sie darauf, dass HKN auch auf neue Sektoren (bspw. Wasserstoff) ausgeweitet werden können, um eine einheitliche europäische Energie- und Klimapolitik zu ermöglichen. Das *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE)* nimmt die Rolle des zentralen Umsetzers europäischer Vorgaben in nationales Recht ein und vertritt die Interessen der deutschen Wirtschaft gegenüber der EU. Seine Perspektive ist davon geprägt, einen Kompromiss zwischen verschiedenen Interessen zu finden: Einerseits muss das BMWE die Funktionsfähigkeit und Glaubwürdigkeit des HKN-Systems sicherstellen und hat ein Interesse an der effizienten Umsetzung der Energiewende (EWI & BET 2025). Damit verbunden ist auch das Interesse, dass das HKN-System zusätzliche Einnahmen generiert, die für diese Umsetzung genutzt werden. Andererseits achtet es auf die administrativen Kosten und die Belastungen für Markakteure. Zudem verfolgt das BMWE industrie- und energiepolitische Ziele, bei denen die Ausgestaltung des HKN-Systems eine entscheidende Rolle spielen kann. Das *UBA* ist als verantwortliche Entität für den Betrieb des HKNR operativ zuständig für die Ausstellung, Übertragung und Entwertung von HKN. Das UBA ist eine Bundesoberbehörde, die nach dem Umweltbundesamtgesetz (UBAG, BGBI. I S. 1505) dem *Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN)* unterliegt. Die Perspektive dieser beiden Stakeholder ist stark von der Integrität des HKN-Systems geprägt. Für das UBA steht daher der Verbraucherschutz im Vordergrund: HKN sollen glaubwürdig sicherstellen, dass Stromkennzeichnung nicht zu Greenwashing führt. Zudem besteht ein Interesse, den administrativen Aufwand und die damit verbundenen Kosten für den Betrieb des HKNRs zu optimieren.

2.3.4 Gesellschaft und Umwelt

Schließlich sind *Umweltverbände* und *Verbraucherorganisationen* einflussreiche gesellschaftliche Stakeholdergruppen. *Umweltverbände* sehen in HKN ein potenziell sinnvolles Instrument, um die Erzeugung erneuerbarer Energien sichtbar zu machen und Markttransparenz herzustellen. Hierzu müssen HKN jedoch zur tatsächlichen Dekarbonisierung des Energiesystems beitragen, was in der

derzeitigen Ausgestaltung (vgl. Kapitel 2) nur eingeschränkt möglich ist. *Verbraucherorganisationen* wiederum vertreten die Perspektive der Stromverbraucher*innen. Sie haben entsprechend ein Interesse an einer einfachen und transparenten Stromkennzeichnung, die Stromverbraucher*innen eine informierte Wahl ermöglicht. Die derzeitige Ausgestaltung des HKN-Systems ist für Laien jedoch schwer verständlich und die Kennzeichnung für Grünstrom kann in der Praxis entsprechend irreführend sein.

3. Konzept eines granularen HKN-Systems

Im Gegensatz zum heutigen System können granulare HKN Strommengen mit hoher zeitlicher und/oder räumlicher Auflösung zuordnen. Damit wird eine nahezu Echtzeit-Zuordnung von Erzeugung und Verbrauch möglich. Eine genaue Definition, ab wann ein HKN granular ist, gibt es dabei nicht und die Ansätze sind vielfältig. Dieses Kapitel erläutert daher anhand der zeitlichen und räumlichen Dimension den Begriff der Granularität im Detail und stellt ein Konzept für eine potenzielle Ausgestaltung eines granularen HKN-Systems auf Basis internationaler Vergleichsperspektiven vor.

Über die beiden Dimensionen der zeitlichen und räumlichen Granularität hinaus verweist die aktuelle (Fach-)Literatur gemäß FÖS (2025) auf weitere Reformoptionen. Anhang B fasst die dabei diskutierten, zentralen Aspekte zusammen. Aufgrund des Fokus dieser Studie auf Granularität sowie Ende-zu-Ende Digitalisierung (vgl. Kapitel 1), werden diese Optionen im Nachfolgenden jedoch nicht weiter diskutiert und bewertet.

3.1 Zeitliche und räumliche Granularität

Die *zeitliche Granularität* beschreibt, in welchen Intervallen Erzeugung und Verbrauch aufeinander bezogen werden können. Möglich sind dabei beispielsweise jährliche, monatliche, tägliche, oder stündliche Intervalle. In der Forschung wird zum Teil sogar eine Viertelstunden- bzw. nahe Echtzeit-Auflösung diskutiert (Jokumsen et al. 2023; Körner et al. 2024). Je feiner die zeitliche Granularität, desto genauer lassen sich wetterbedingte Schwankungen der erneuerbaren Stromproduktion mittels HKN abbilden. Durch eine Zuordnung von beispielsweise viertelstundenscharfen HKN mit dem komplementären viertelstundenscharfen Stromverbrauch wird es möglich, zeitliche Überschüsse und Knappheiten von erneuerbarem Strom sichtbar zu machen und Anreize für ein flexibleres Stromverbrauchsverhalten zu setzen.

Über die zeitliche Dimension hinaus gewinnt die *räumliche Granularität* zunehmend an Bedeutung. Granulare HKN können eine räumliche Differenzierung ermöglichen und dadurch Realweltbedingungen wie Netzrestriktionen besser berücksichtigen. Eine höhere Granularität wäre im Vergleich zum aktuellen System bereits etwa die Unterscheidung nach Netzgebieten oder Ländern. Vorschläge für granulare Ansätze gehen in der Regel aber noch weiter und beziehen sich meist auf einzelne Regionen, Netzgebiete oder Knotenpunkte im Übertragungs- und Verteilnetz bis hin zur anlagenscharfen Zuordnung von Erzeugung und Verbrauch (Körner et al. 2024). Je höher die räumliche Granularität, desto besser können Netzrestriktionen, Transportkapazitäten und Engpässe sowie regionale Präferenzen abgebildet werden. Methoden wie Power Flow Tracing zeigen dabei, dass sich physikalische Stromflüsse auch bis auf die Ebene einzelner Erzeugungs- und Verbrauchsknoten nachverfolgen lassen, sodass sich HKN nicht nur

auf eine Bilanzierungslogik, sondern auch auf fundierte Aussagen über die physische Nutzung erneuerbarer Energie stützen könnten (Ströher und Strüker 2025).

Zeitliche und räumliche Granularität sind zwei komplementäre Dimensionen, die jeweils in unterschiedlichen Stufen ausgeprägt sein können. Ein System, das auf beiden Dimensionen eine weitaus höhere Granularität als die aktuelle Ausgestaltung deutscher HKN abbildet, ermöglicht eine deutlich transparentere und glaubwürdigere Kennzeichnung von Strom. Zudem lässt sich der konkrete CO₂-Fußabdrucks des Stromverbrauchs ausweisen, anstatt einer rein binären Kennzeichnung in „grün“ oder „nicht grün“. Es macht somit sichtbar, wann und wo erneuerbarer Strom aus welcher Quelle tatsächlich verfügbar ist, und schafft damit eine Informationsbasis, die für eine Vielzahl an Stakeholdern von wachsender Bedeutung ist (vgl. Kapitel 5). Hierdurch ergeben sich auch neue Möglichkeiten der Inwertsetzung und Hebung grüner und lokaler Präferenzen.

Power Flow Tracing

Power Flow Tracing ist ein Sammelbegriff für eine Reihe von Methoden, die die Berechnung der Stromübertragung, z. B. von einzelnen Generatoren zu einzelnen Lasten, auf Basis von physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie den Kirchhoffsschen Regeln ermöglichen.

Damit wird es möglich, HKN nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich glaubwürdig mit den physikalischen Stromflüssen zu koppeln und so eine höhere Transparenz über die tatsächliche Herkunft des verbrauchten Stroms zu schaffen.

3.2 Internationale Vergleichsperspektiven

Die Diskussion um granulare HKN ist nicht auf Deutschland beschränkt. Mehrere europäische und außereuropäische Länder entwickeln und erproben derzeit granulare HKN-Systeme, die als wichtige Referenz für die deutsche Umsetzung dienen können (siehe Abbildung 2).

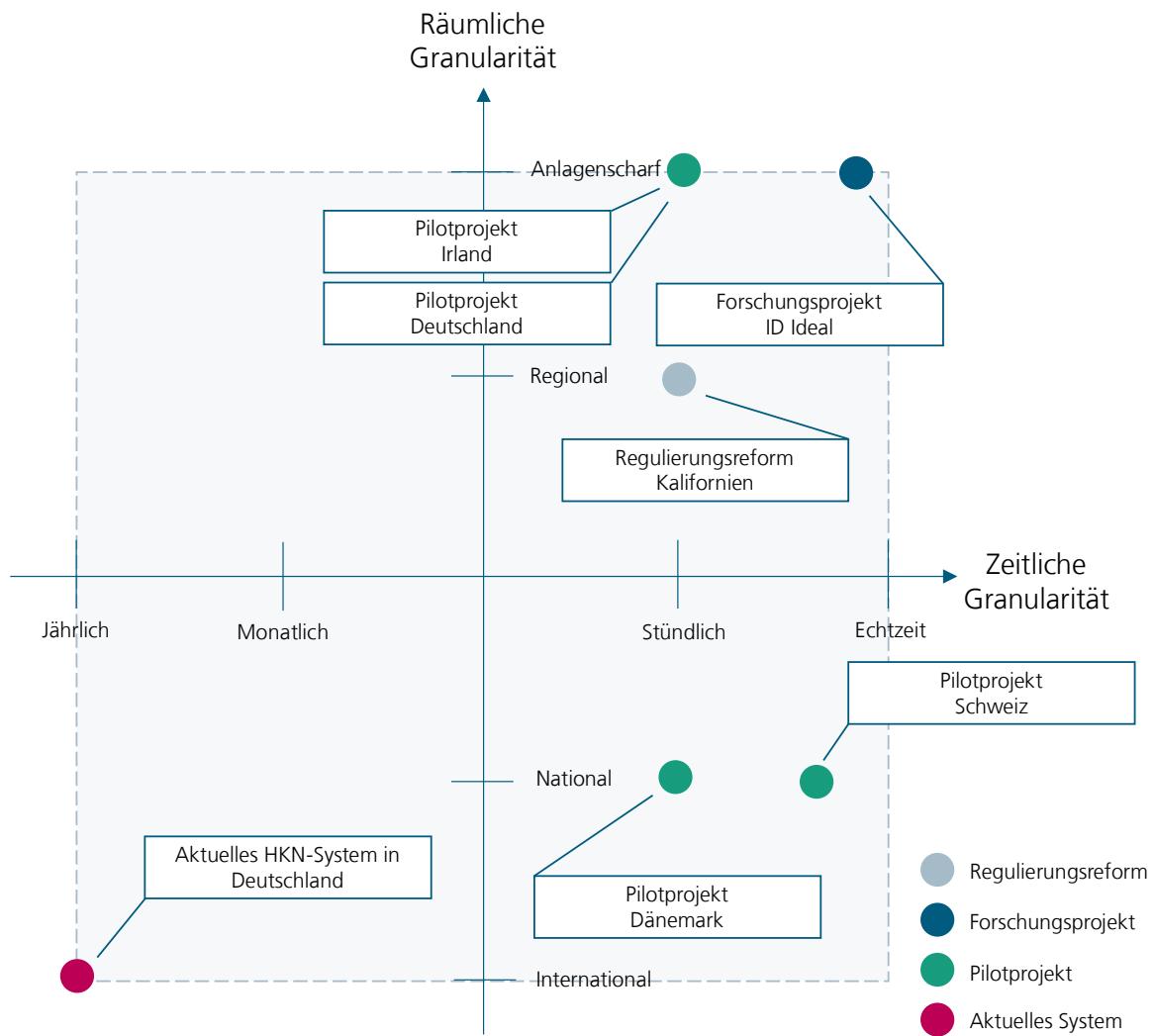


Abbildung 2: Internationaler Vergleich über aktuelle Entwicklungen in Richtung granulare HKN. Quelle: Eigene Darstellung

Im Folgenden umreißen wir daher relevante internationale Initiativen aus anderen Ländern:

- Ein gemeinsames Pilotprojekt in Deutschland von LichtBlick, dem Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz und Granular Energy ermöglichte bereits eine stündliche Granularität bei der Erstellung von HKN. Über eine Plattform ließen sich grüne Strommengen am konkreten Erzeugungs-Stundenintervall anlagenscharf nachverfolgen – festgehalten über das „Energy Track and Trace“-Register der Elia Gruppe, dem dänischen Netzbetreiber Energinet und dem estnischen Netzbetreiber Elering (24/7 Hub 2023).
- Im Rahmen des ebenfalls *deutschen* Förderprojekts ID-Ideal wurde ebenfalls ein Ansatz für digitale, granulare HKN entwickelt. Strommengen und ihre CO₂-Intensität sollen hier in (viertel-)stündlichen Intervallen per Smart Meter erfasst, in digitale Zertifikate überführt und entlang der Lieferkette weitergereicht werden. Durch digitale Identitäten und kryptografisch gesicherte Nachweise können dabei Datenhoheit, Manipulationssicherheit sowie Interoperabilität gewährleistet werden.
- In Zusammenarbeit mit dem Verein für umweltgerechte Energie hat Granular Energy ein Pilotprojekt gestartet, das (viertel-)stündliche Intervalle für HKN in der Schweiz testet. Ziel

ist es, Erzeugung und Verbrauch in nahezu Echtzeit zuzuordnen – eine deutliche Verbesserung gegenüber der bislang jährlichen Granularität. Die neue Zertifizierung soll ab 2025 getestet und ab 2026 etabliert werden (Granular Energy 2024b).

- In *Irland* hat das staatliche EVU ESB in Kooperation mit Granular Energy ein Pilotsystem entwickelt, das stündliche HKN für kommerzielle Kunden ermöglicht. Dabei wurde beispielsweise die Produktion eines Windparks in Echtzeit der Verbrauchsstunde eines Kunden zugewiesen und transparent ausgewiesen (ESB 2024; Granular Energy 2024a).
- Der *dänische* Übertragungsnetzbetreiber und offizielle Aussteller von HKN Energinet wurde von der EnergyTag-Initiative als erster Anbieter akkreditiert, um Granular Certificates in Echtzeit ausstellen zu können. Damit ist die zeitliche Granularität (stündlich) für dänische Verbraucher möglich. Weitere Anbieter wie Flexidao wurden ebenfalls akkreditiert und können nun Monatszertifikate mit stündlichen Produktionsdaten kombinieren (EnergyTag 2025).
- In *Kalifornien* hat die California Energy Commission im Rahmen des Verfahrens Rulemaking Adopting Amended Power Source Disclosure Regulations eine Reform beschlossen, mit der das bisherige jährliche Power Source Disclosure-Programm auf eine stündliche Auflösung umgestellt wird (Piper 2025). Ab 2028 müssen Stromlieferanten ihre Beschaffung und den zugehörigen CO₂-Ausstoß stündlich ihrem Lastprofil zuordnen. Damit setzt Kalifornien erstmals verbindlich auf Granular Certificates, um die Glaubwürdigkeit von Stromkennzeichnung zu erhöhen und Investitionen in Speicher- und saubere Erzeugungstechnologien zu fördern.

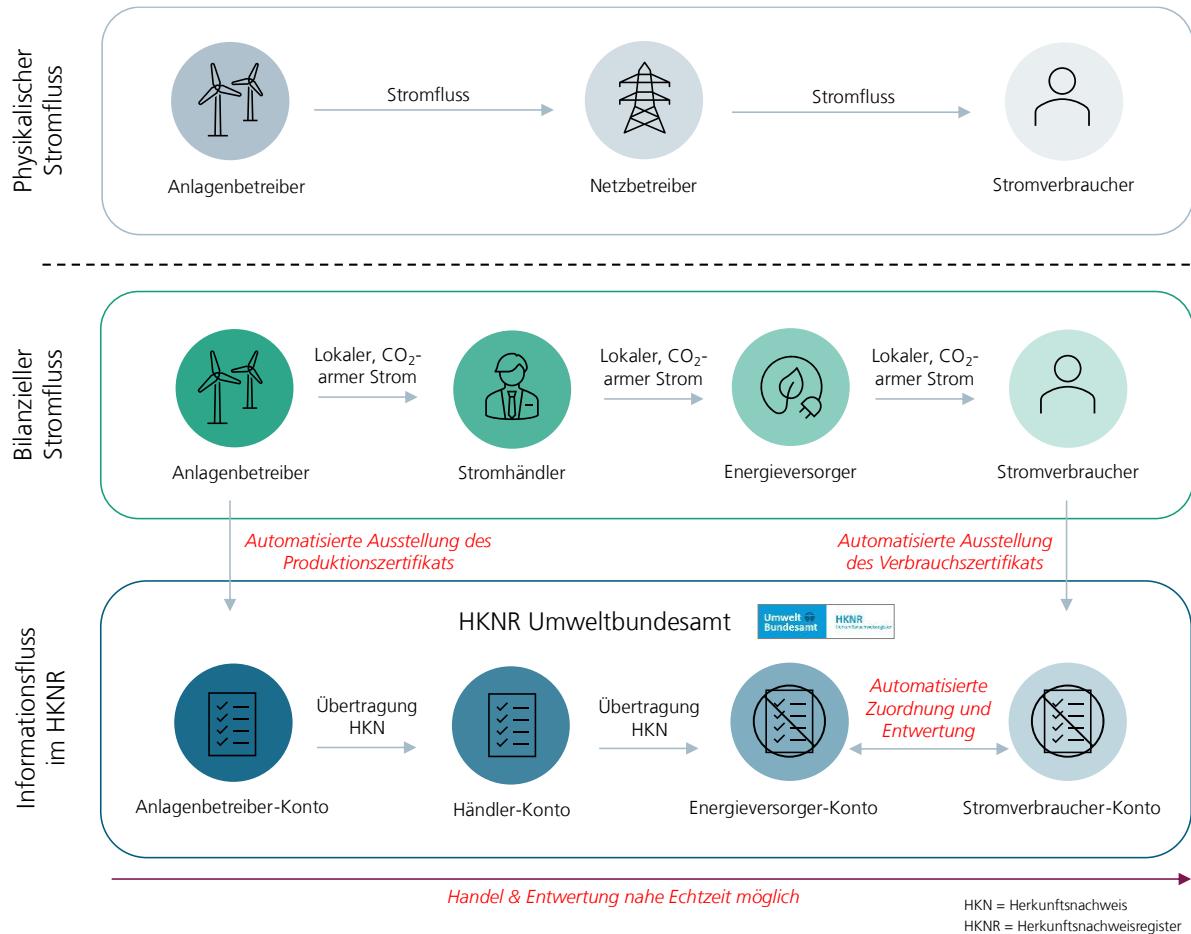
Diese internationalen Beispiele verdeutlichen einen Trend zu granularen HKN und belegen die internationale Anschlussfähigkeit der potenziellen Einführung granularer HKN in Deutschland. Zudem zeigen Sie auf, dass sich verschiedene europäische Länder auf nationale Umsetzungen der RED III, die mehr Nachweisbarkeit für Strom aus erneuerbaren Energien innerhalb der EU verpflichtend fordert (vgl. Kapitel 4), vorbereiten.

3.3 Potenzielle Ausgestaltung granularer HKN für Deutschland

Der internationale Vergleich (s. Kapitel 3.2) verdeutlicht zum einen, dass aktuelle Ansätze häufig den Fokus auf die zeitliche Granularität setzen und zum anderen, dass sich viele Vorhaben noch in der Pilotierungsphase befinden. Vor diesem Hintergrund erscheint eine vollständige und sofortige Umstellung auf ein räumlich und zeitlich granulares System sowohl technisch als auch politisch als sehr anspruchsvoll. Nachfolgend diskutieren wir deshalb ein praxistaugliches Konzept auf Basis des vorgestellten Konzepts von Energy Track and Trace (2022).

3.3.1 Zielbild für granulare HKN

Im Zielbild wird die Stromherkunft zeitbasiert als granularer HKN dokumentiert, sodass Erzeugung und Verbrauch in derselben Zeiteinheit eindeutig zusammengeführt werden können. Die entsprechend granularen HKN sollten zudem Attribute wie Anlagentyp, Standort und Emissionsintensität abbilden, um physikalische Verfügbarkeiten realitätsnäher zu spiegeln (Energy Track and Trace 2022). Dabei ist es sinnvoll, die kleinsten bereits von Smart Metern unterstützten Einheiten zu verwenden. Für Strom werden daher Wattstunden (Wh) als Einheit in Kombination mit einer 15-Minuten-Auflösung empfohlen. Abbildung 3 skizziert unser Konzept für granulare HKN, in Rot sind jeweils die zentralen Änderungen zum Status Quo markiert.



3.3.2 Preismodelle und Anreizwirkungen

Eine räumliche und zeitliche Zuordnung von Erzeugungs- und Verbrauchszertifikaten sorgt dafür, dass ein deutlich geringeres Angebot an Zertifikaten für die konkret in einem bestimmten Zeitraum und an einem bestimmten Ort verbrauchte Strommenge vorliegt. Dementsprechend sind als Resultat Preisschwankungen für HKN zu erwarten. Heute sind HKN weitgehend homogen bepreist, unabhängig davon, zu welcher Zeit oder an welchem Ort der Strom erzeugt wurde. In einem granularen System hingegen könnten die Preise stärker variieren. Strom aus erneuerbaren Energien in Zeiten knapper Erzeugung wird entsprechend einen höheren Wert haben. Beispielsweise könnten HKN für Abendstunden im Winter, in denen Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen gleichzeitig geringe Einspeisungen liefern (Dunkelflaute), deutlich teurer gehandelt werden als HKN für windreiche und sonnige Mittagsstunden im Sommer (Hellbrise). Darüber hinaus ist zu erwarten, dass auch lokal differenzierte Preiskomponenten einen stärkeren Einfluss haben: Für industriestarke Regionen in Süddeutschland mit wesentlich höherem Stromverbrauch als Einspeisung aus erneuerbaren Energien sind beispielsweise im Schnitt eine höhere Zahlungsbereitschaft und damit teurere HKN zu erwarten als in Regionen mit viel Offshore-Windenergie und geringerem Strombedarf (FÖS 2025). Diese Preissignale würden den Marktakteuren klare ökonomische Anreize und Möglichkeiten bieten, ihre Investitionen und ihr Verhalten an ihren Präferenzen sowie den Bedürfnissen des Energiesystems auszurichten (NESO 2025). Die Vor- und Nachteile eines solchen Anreizmechanismus durch granulare HKN werden näher in Kapitel 4 beleuchtet.

3.3.3 Zertifikatsdesign

Die Grundlage für ein granulares HKN-System bilden getrennte Erzeugungs- und Verbrauchszertifikate, die je Zeitintervall und Wh aus verifizierten Messwerten ausgestellt, via Smart Meter Gateways (der Kommunikationseinheit des Smart Meter) übertragen und miteinander verrechnet werden können. Dabei werden die entsprechenden Stromverbräuche bzw. Stromeinspeisungen der Verbrauchs- bzw.

Smart Meter

Ein Smart Meter oder auch „intelligentes Messsystem“ besteht aus einer modernen Messeinrichtung zur Messung des viertelstundenscharfen Stromverbrauchs und einem Smart Meter Gateway, der Kommunikationseinheit zur sicheren Übertragung der Messwerte (BNetzA 2024).

Derzeit bleibt der Rollout des Smart Meter Gateways in Deutschland deutlich hinter den Erwartungen zurück und kann mit der Zunahme flexibler Kleinstanlagen nicht Schritt halten. Somit können über eine steigende Anzahl an Anlagen im Energiesystem keine granularen Messdaten (z. B. in 15-Minuten-Intervallen) erfasst und weitergegeben werden.

Erzeugungsanlagen via Smart Meter übertragen, was die Datengrundlage für die spätere Erstellung der Zertifikate darstellt. Die Zertifikate selbst sollten teilbar sein, wodurch Teilmengen handel- und zuordenbar werden, ohne die Gesamtbilanz aus erzeugtem und verbrauchtem Strom aus erneuerbaren Energien zu verletzen (Energy Track and Trace 2022).

3.3.4 Register und Governance

Die skalierbare Ausstellung, Übertragung und Entwertung granularer HKN erfordert ein Register, das automatisiert, schnell und vertrauenswürdig eine große Anzahl an Zertifikaten verwalten kann. Ein wichtiger Aspekt besteht dabei in der effizienten Registrierung der Anlagen und dem Abruf der Stammdaten (z. B. Ort und Typ der Erzeugungsanlage sowie Erzeugungsleistung). Zudem bedarf es zur Übertragung der relevanten Messdaten für kleine Erzeugungsanlagen eines flächendeckenden Smart Meter Rollouts inklusive entsprechender Schnittstellen zum HKNR zur Eintragung der Stromerzeugungs- und -verbrauchsdaten. Für größere Anlagen ab einer installierten Leistung von 100 kW ist eine 15-Minuten-Bilanzierung durch RLM-Zähler (Registrierende Leistungsmessung) möglich (vgl. § 9 EEG). Bislang müssen Anlagen im MaStR manuell angemeldet werden, sodass auch die Synchronisierung von Änderungen ausschließlich händisch erfolgt. Dadurch entstehen nicht nur fehlerhafte Einträge, sondern es fehlt auch ein aktuelles und verlässliches Gesamtbild über den Anlagenbestand.

4. Anpassungsbedarfe und Transformationspfad

Die Einführung eines granularen HKN-Systems, wie es in Kapitel 3 skizziert ist, erfordert Anpassungen des Status Quo. In diesem Kapitel beleuchten wir deshalb die regulatorischen und technischen Rahmenbedingungen des deutschen HKN-Systems und zeigen einen praxistauglichen Transformationspfad vom aktuellen hin zu einem granularen HKN-System auf.

4.1 Technische Anpassungsbedarfe

Die flächendeckende Ausstattung mit *Smart Metern* (oder RLM-Zählern), die sowohl Erzeugung als auch Verbrauch von Strom in kurzen Intervallen erfassen und weiterleiten können, ist eine Grundvoraussetzung für granulare HKN (FfE 2023). Dies erfordert erhebliche Investitionen in die digitale Infrastruktur sowie einen beschleunigten Rollout von Smart Metern, um insbesondere flexible kleinere Verbraucher mit der notwendigen Messtechnik auszustatten und so die Datengrundlage für eine netzdienliche Steuerung ihres Verbrauchs zu schaffen.

Parallel dazu müsste das HKNR technisch so weiterentwickelt werden, dass es nicht nur die derzeitigen Mengen an HKN, die durch jährliche Bilanzierung und 1MW-Zuordnung entstehen, sondern auch eine hohe Anzahl an granularen HKN mit räumlicher Zuordnung zuverlässig verarbeiten kann. Um die wachsenden Datenmengen effizient zu integrieren, sind standardisierte Schnittstellen zwischen Messstellen, Netzbetreibern und Registern unerlässlich. Damit das UBA auch in einem granularen HKN-System seine Rolle als Issuing Body weiterhin zuverlässig erfüllen kann, müsste seine technische Infrastruktur jedoch grundlegend modernisiert werden. Kosten und Entwicklungsaufwand könnten durch die Nutzung von Synergien, etwa mit dem MaStR, reduziert und durch Skaleneffekte abgefedert werden (dena 2025).

Netzdienlichkeit von HKN

Unter Netzdienlichkeit verstehen wir Maßnahmen, die einen Beitrag leisten, die Netzauslastung zu optimieren, erneuerbare Energien effizient in das Stromnetz zu integrieren und dadurch Redispachtkosten sowie Netzausbaukosten zu reduzieren.

HKN sind in der aktuellen Ausgestaltung ein rein marktliches Instrument, das Netzdienlichkeit nicht berücksichtigt. Granulare HKN können mit entsprechenden regionalen und zeitlichen Preisunterschieden netzdienliches Verhalten anreizen.

Besondere Herausforderungen ergeben sich bei der *Verifizierbarkeit der Daten*. Während im heutigen System monatliche oder jährliche Prüfungen ausreichen, erfordert ein granulares HKN-System eine kontinuierliche, nahezu in Echtzeit erfolgende Überprüfung und Abgleich von Erzeugung und Verbrauch. Diese muss Manipulationen ausschließen, Datenintegrität, Datenschutz sowie Datensicherheit bewahren und gleichzeitig skalierbar bleiben. Während Messstellenbetreiber bereits verlässliche Messdaten in kurzen Intervallen weitergeben können, ist der aktuelle Registerbetrieb hierfür aktuell nicht ausgelegt: Registrierung, Beantragung, Übertragung und Entwertung erfolgen in weiten Teilen manuell und sind entsprechend zeitaufwendig (dena 2022; FfE 2023). Somit könnten initial korrekte Messdaten bspw. durch

bewusste Manipulation oder unbewusste Fehler im Prozess der Erstellung, Weitergabe und Entwertung der HKN zu unrechtmäßigen HKN führen.

Eine umfassende *Automatisierung der Prozesse* auf Basis digitaler Register ist daher zu priorisieren. Auf diese Weise würde nicht nur die notwendige Skalierbarkeit geschaffen, sondern auch der manuelle Aufwand reduziert. Forschung und Pilotprojekte zeigen bereits technologische Ansätze zur Modernisierung von Registern auf: So wurden u. a. vielversprechende Ansätze auf Basis verteilter Infrastrukturen und/oder digitalen Maschinenidentitäten vorgestellt (Körner et al. 2024).

4.2 Regulatorische Anpassungsbedarfe

Das deutsche HKN-System beruht auf mehreren rechtlichen Säulen, die sowohl nationale als auch europäische Regelungen umfassen (siehe Tabelle 1).

Name	Abkürzung	Ebene	Relevanz für HKN
Energie- wirtschafts-gesetz	EnWG	National	Regelt in § 42 die Stromkennzeichnungspflichten, einschließlich der Nutzung von HKN.
Herkunfts- und Regional- nachweis- Durchführungs- verordnung	HkRNDV	National	Konkretisiert die Anforderungen an die Ausstellung, Übertragung und Entwertung von HKN.
Herkunfts- nachweis-register- Gesetz	HkNRG	National	§ 7 enthält eine Verordnungsermächtigung, die den Abgleich und Austausch von Daten zwischen den HKN-Registern für Strom, Gas und Wärme ermöglicht. Damit wird die Grundlage für sektorübergreifende Nachweissysteme geschaffen.
Erneuerbare- Energien-Gesetz	EEG	National	Enthält das Doppelvermarktungsverbot (§ 80 EEG), das die Ausstellung von HKN für EEG geförderten Strom ausschließt.
Erneuerbare Energien Richtlinie	RED III	Europäisch	Art. 19 formuliert die (Aktualisierung der in RED II definierten) Anforderungen an HKN; Art. 27 und 28 fordern eine bessere Nachweisbarkeit und Dokumentation von Strom aus erneuerbaren Energien. Zudem ist das deutsche System über die AIB in das europäische HKN-System eingebettet.

Tabelle 1: Nationale und internationale Regulatorik für HKN. Quelle: Eigene Darstellung

Im aktuellen regulatorischen Rahmen ist die Ausstellung granularer HKN bereits heute möglich. Sie stellen jedoch nur eine *freiwillige Zusatzinformation* dar und haben weder verpflichtenden Charakter noch Relevanz für offizielle Vorgaben wie die Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen. Insgesamt bleibt der Zusatznutzen aktuell für die beteiligten Marktteilnehmer zu gering, das heißt es entwickelt sich keine hinreichende Nachfrage nach granularen HKN und damit auch kein entsprechendes Angebot und umgekehrt.

Eine regulatorische Verpflichtung könnte grundsätzlich die Nachfrage nach granularen HKN erhöhen. Allerdings erscheint angesichts der heterogenen Interessenlage zwischen und innerhalb

der unterschiedlichen Stakeholdergruppen (vgl. Kapitel 2) ein Zwang zur Nutzung granularer HKN weder praktikabel noch wünschenswert. Eine abrupte Einführung wäre mit erheblichen Herausforderungen verbunden:

- Technisch ließen sich zeitlich und räumlich granulare HKN kurzfristig kaum umsetzen, da die erforderliche Ende-zu-Ende-Digitalisierung der Stromversorgungskette noch nicht vollständig etabliert ist und essenzielle Infrastrukturkomponenten wie Smart Meter in der Breite fehlen.
- Wenn vielerorts zeitweise nicht genügend erneuerbarer Strom verfügbar ist, könnten die Preise regional stark variieren und teils erheblich steigen.
- Betroffene Marktteilnehmer wären kurzfristig womöglich organisatorisch und finanziell überfordert.

Ziel ist es daher, die Einführung granularer HKN durch gezielte Anreize, statt regulatorischem Zwang voranzutreiben. Finanzielle Vorteile, die an den Einsatz granularer HKN in spezifischen Anwendungsfällen im Energiesystem gekoppelt sind, können den Markt für granulare HKN schrittweise aktivieren und eine konsistente und zugleich flexible Transformation zu granularen HKN ermöglichen.

Es zeigen sich bereits heute verschiedene Anwendungsfälle, in denen bestehende (finanzielle) Vorteile für unterschiedliche Stakeholdergruppen perspektivisch an granulare HKN gekoppelt werden könnten, beispielsweise:

- **Erhalt individueller Netzentgelte mit nachweislich netzdienlichem Verbrauch:**
Individuelle Netzentgelte nach § 19 Abs. 2 Satz 2 StromNEV werden bislang energieintensiven Industrieunternehmen für einen möglichst gleichmäßigen Strombezug gewährt. Vor dem Hintergrund der wachsenden Bedeutung von Flexibilität im Energiesystem gilt diese Regelung zunehmend als nicht mehr zeitgemäß. Im Zuge der laufenden Reform der individuellen Netzentgelte wird daher erwartet, dass künftige Netzentgeltrabatte an einen nachweislich flexiblen, netzdienlichen Stromverbrauch gekoppelt werden – etwa in Abhängigkeit von der regionalen Verfügbarkeit erneuerbarer Energien.
Granulare HKN könnten hier als Nachweisinstrument zur Bestätigung der zeitlichen und räumlichen Übereinstimmung von Erzeugung und Verbrauch dienen. Hierdurch würde ein starker Anreiz für energieintensive Industrieunternehmen entstehen, granulare HKN zu verwenden.
- **Der Nachweis der Emissionsintensität von Strom im Rahmen der Treibhausgasminderungs- (THG-)Quote:**
Granulare HKN können zudem ein zentraler Baustein für die Weiterentwicklung und Vereinfachung der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote) werden. Die THG-Quote ist eine gesetzliche Maßnahme, die Mineralölunternehmen dazu verpflichtet, den CO₂-Ausstoß fossiler Kraftstoffe schrittweise zu senken. Elektrofahrzeug-Besitzer*innen können von der THG-Quote profitieren, indem sie ihre nachgewiesenen CO₂-Einsparungen über zertifizierte Händler an die Mineralölkonzerne verkaufen, die dadurch ihre Quote erfüllen und dafür eine Prämie an den Elektrofahrzeug-Besitzer*innen zahlen. Granulare HKN liefern genau die zeitliche und räumliche Transparenz, die das aktuelle Nachweissystem erfordert. Derzeit müssen Betreiber von Ladeinfrastruktur für die

Anrechnung von Grünstrom an der Ladesäule über registrierte Lastgangmessungen im 15-Minuten-Takt nachweisen, dass Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen und Verbrauch zeitgleich erfolgen. Diese Anforderung erfordert komplexe Messtechnik und administrative Prozesse, wodurch viele Betreiber die Möglichkeit zur THG-Anrechnung bislang nicht nutzen. Elektrofahrzeug-Besitzer*innen nutzen deshalb häufig die Möglichkeit der THG-Quote, Pauschalen anzusetzen, welche die tatsächliche Treibhausgasminderung nicht realistisch darstellen.

- **Die priorisierte Genehmigung von Netzanschlussbegehren für Projekte mit netzdienlichem Beitrag:**

Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien und der sektorübergreifenden Elektrifizierung übersteigt die Zahl der Netzanschlussbegehren häufig die verfügbare Netzkapazität. Netzbetreiber stehen dadurch vor der Herausforderung, Anträge zu priorisieren und Projekte nach objektiven Kriterien zu bewerten. Eine Möglichkeit wäre, netzdienliche Nutzungskonzepte als Priorisierungskriterium heranzuziehen. Granulare HKN könnten hierbei als Beleginstrument für die tatsächliche Netzdienlichkeit eines Projekts dienen, wodurch ein Anreiz zur Verwendung granularer HKN bei neuen Netzanschlussbegehren entsteht.

4.3 Transformationspfad zu granularen HKN

Diese Beispiele verdeutlichen die Vielfalt der möglichen Anwendungsfälle und entsprechenden Anreizwirkung granularer HKN – und damit auch die Notwendigkeit einer gewissen Flexibilität in der Transformation hin zu granularen HKN. Daher sollte ein Transformationspfad zu granularen HKN den übergreifenden Orientierungsrahmen für die Markt- und Systementwicklung darstellen und somit dafür Sorge tragen, dass die Einführung schrittweise, konsistent und koordiniert erfolgt. Zugleich sollte innerhalb des Transformationspfades auch ausreichend Gestaltungsspielraum bestehen, um auf die unterschiedlichen technischen, regulatorischen und marktseitigen Voraussetzungen der betreffenden Anwendungsfälle eingehen zu können.

Diese flexible Ausgestaltung ist notwendig, weil sich die Anwendungsfälle in ihren Anforderungen an zeitliche und räumliche Granularität, Datenverfügbarkeit und Marktreife teils erheblich unterscheiden. Während etwa im Bereich der Emissionsnachweise bereits digitale Mess- und Bilanzierungssysteme bestehen, erfordert die Nutzung granularer HKN für netzdienliche Verbrauchsmodelle insbesondere von Privathaushalten noch den Ausbau entsprechender Smart-Meter-Infrastruktur. Ein einheitlicher, starrer Transformationspfad nach dem Prinzip „one size fits all“ würde diesen Unterschieden nicht gerecht, könnte die Umsetzung verlangsamen und die Akzeptanz bei Marktteuren verringern.

Der vorgeschlagene Transformationspfad soll daher als gemeinsamer Fahrplan mit anpassbaren Etappen verstanden werden. Diese Etappen können im Grad der zeitlichen und räumlichen Granularität der HKN je nach Anwendungsfall variieren, bleiben aber übergeordnet auf dasselbe Zielbild ausgerichtet: Die systemweite, marktorientierte Einführung granularer HKN. So entsteht ein kohärenter Transformationspfad mit Raum für anwendungsspezifische Differenzierung (siehe Abbildung 4).

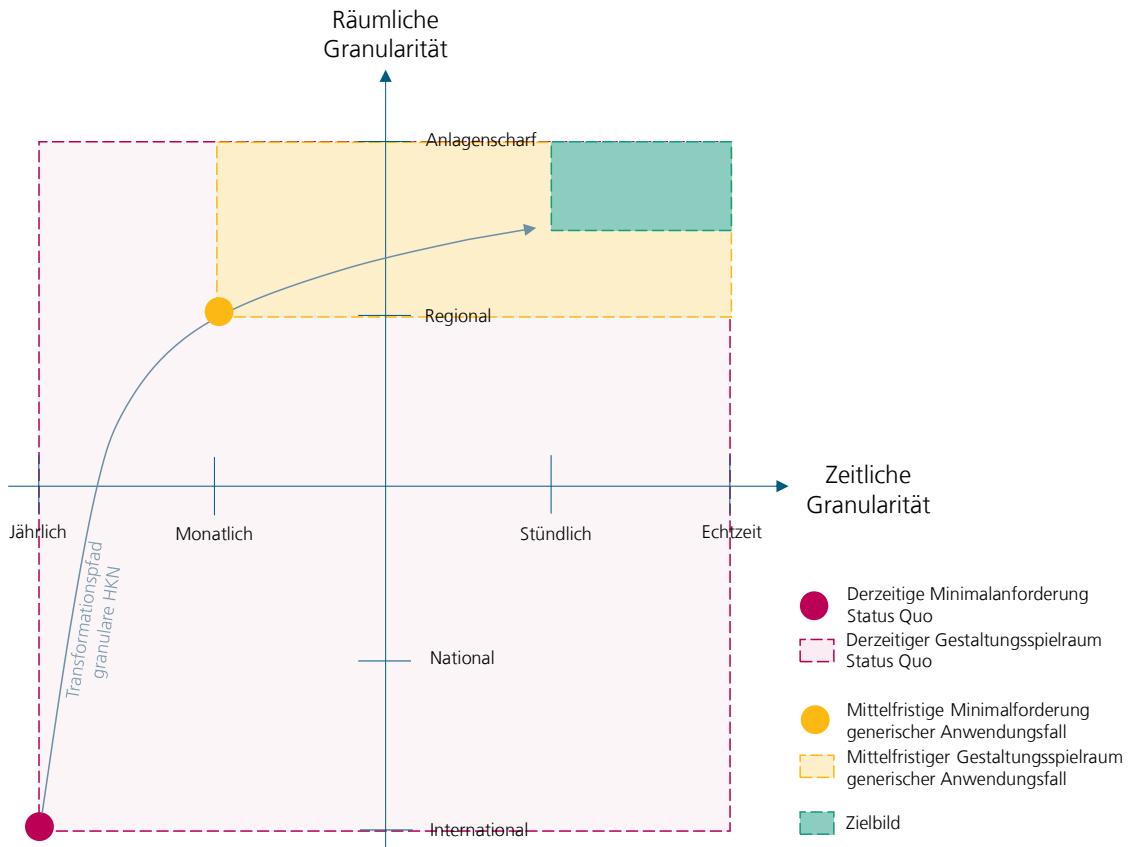


Abbildung 4: Ein Transformationspfad zur Einführung granularer HKN (qualitativ). Quelle: Eigene Darstellung

Unser Transformationspfad (grauer Pfeil) beschreibt dabei die langfristige Entwicklung vom Status Quo (rote Fläche) hin zu granularen HKN im Zielbild (grüne Fläche). Um die Nutzung granularer HKN entlang des skizzierten Transformationspfades sukzessive und systematisch zu fördern, müssen freiwillige Anreize zur Verwendung granularer HKN definiert, kommuniziert und regelmäßig überprüft werden. Auf diese Weise sollen lokale Investitionsanreize für erneuerbare Energien sowie für eine flexiblere Stromnachfrage entstehen. Die konkreten Maßnahmen sowie der konkrete Pfad (also der Verlauf der Kurve in Abbildung 4) können dabei je nach Anwendungsfall unterschiedlich sein: Anwendungsfälle mit potenziell weitreichenden Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft – beispielsweise eine drohende Abwanderung von Industrie durch ein regional erhöhtes Preisniveau granularer HKN – könnten einen behutsameren Pfad einschlagen (schwächere Krümmung der Kurve in Abbildung 4) als weniger kritische Anwendungsfälle.

Damit der Transformationspfad hin zu granularen HKN tragfähig ist, braucht es flankierend zu den oben diskutierten, konkreten Anreizmechanismen für spezifische Anwendungsfälle übergreifende Bemühungen zur Steigerung der freiwilligen Nutzung von HKN. Empirische Studien zeigen bereits auf, dass bestimmte Personengruppen – beispielsweise solche mit altruistischer Einstellung, hohem Umweltbewusstsein oder starkem regionalen Identitätsgefühl – Präferenzen für lokalen Strom aufzeigen (Feldhaus et al. 2022). Wenn es Unternehmen gelingt, diese Zielgruppen adäquat zu adressieren und Preisprämien für Stromverträge mit granularen HKN abzurufen, können neue Geschäftsmodelle und damit ein nachhaltiges Angebot an granularen HKN entstehen.

Zudem ist die Schaffung eines stärkeren Nachhaltigkeitsbewusstseins in der Breite der Gesellschaft sinnvoll, um diese Zielgruppen zu vergrößern. Gezielte Informationskampagnen können bspw. etwaige Vorurteile reduzieren und Menschen dazu motivieren, Instrumente wie granulare HKN zu verwenden. Diese Studie stellt bereits einen ersten Schritt dar, um über die Herausforderungen des aktuellen HKN-Systems und die Mehrwerte granularer HKN zu informieren. Politische Entscheidungsträger sollten bei der Umsetzung etwaiger Maßnahmen darauf aufbauen, um eine breite gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen.

5. Stakeholder und Nutzenargumentation

Die Einführung granularer HKN in Deutschland betrifft eine Vielzahl politischer Institutionen, deren Unterstützung und Koordination für den Erfolg eines solchen Vorhabens maßgeblich ist. Daher werden im Folgenden der potenzielle Nutzen sowie potenzielle Herausforderungen granularer HKN für die in Kapitel 2 definierten Stakeholdergruppen ausgeführt, um einen Überblick für politische Entscheidungsträger zu schaffen. Nachfolgend findet sich eine Darstellung der aus Sicht der Autoren wichtigsten Nutzenpotenziale und Herausforderungen je Stakeholdergruppe entlang des Systems granularer HKN; die Abschnitte strukturieren die Perspektiven von Stromanbietern, Stromnachfragern, Politik/Regulierung sowie Gesellschaft/Umwelt. Aufgrund der Heterogenität innerhalb der einzelnen Stakeholdergruppen lässt sich dabei keine abschließende Bewertung bzw. Abwägung der Argumente für und gegen granulare HKN vornehmen. Vielmehr soll unsere Darstellung eine Übersicht über zentrale Argumente bieten, die politische Entscheidungsträger bei einer möglichen Ausgestaltung berücksichtigen sollten. Anhang C fasst die nachfolgend ausgeführten Aspekte zusammen.

5.1 Stromanbieter

Anlagenbetreiber

Für Anlagenbetreiber ergibt sich der Nutzen granularer HKN insbesondere durch eine höhere Wertschöpfung infolge der gezielten Vermarktung von Grünstrom mit hohem Qualitätsmerkmal, durch die höhere zeitliche und räumliche Auflösung beziehungsweise Zuordenbarkeit der HKN. Darüber hinaus setzen die entsprechend zeitlich und räumlich differenzierten HKN-Preise gezielte Investitionsanreize zur effizienten und netzdienlichen Integration erneuerbaren Energien. Anlagenbetreiber nutzen regionale Preisunterschiede, indem sie verstärkt in Regionen mit geringerer Einspeisung und damit höheren HKN-Preisen investieren. Im Umkehrschluss trägt dieses zusätzliche Angebot an erneuerbarer Stromerzeugung im Zeitverlauf dazu bei, regionale Preisunterschiede zunehmend zu verringern. Ein weiterer Vorteil besteht in der Zeitersparnis, die durch die Übertragung von HKN im Rahmen einer Ende-zu-Ende-Digitalisierung im Vergleich zum Status Quo erzielt wird.

Demgegenüber führen insbesondere volatile HKN-Preise zu Unsicherheiten in der Planung und Vermarktung von Grünstromprodukten. Für kleinere Anlagen stellen zudem fehlende Skaleneffekte und der damit verbundene hohe Fixaufwand zur Integration in ein granulares HKN-System Herausforderungen dar. Schließlich besteht die Gefahr, dass in einzelnen Regionen aufgrund fehlender Stromnachfrage auch keine ausreichende Nachfrage nach granularen HKN besteht, wodurch die Wirtschaftlichkeit dieser Ansätze eingeschränkt wird.

Stromhändler

Auch für Stromhändler eröffnen sich durch den Handel mit granularen HKN neue Geschäftsmodelle beziehungsweise die Möglichkeit zur Produktdifferenzierung. Mittels granularer HKN lassen sich glaubwürdigere Grünstromprodukte gegenüber EVU gestalten und anbieten. Darüber hinaus profitieren Stromhändler, analog zu Anlagenbetreibern, von einer deutlichen Zeitersparnis bei der Übertragung von HKN, die durch eine Ende-zu-Ende-Digitalisierung ermöglicht wird.

Allerdings geht dieser potenzielle Nutzen mit Herausforderungen einher: So entstehen durch volatile HKN-Preise Unsicherheiten und Risiken bei der Bepreisung von Grünstromprodukten. Hinzu kommt die Komplexität in der Verwaltung vieler granularer HKN, insbesondere in der Übergangsphase hin zu einem Ende-zu-Ende digitalisierten, granularen HKN-System. Damit verbunden sind hohe Anforderungen an die Systemintegration der granularen HKN, das Datenmanagement und die IT-Sicherheit, weil entsprechend sensible Attributdaten zu Stromverbrauch und -einspeisung zuverlässig über Schnittstellen verarbeitet und vor Manipulation geschützt werden müssen.

EVU

Für EVU ergeben sich ebenfalls neue Geschäftsmodelle durch den Handel mit granularen HKN. Diese ermöglichen eine zielgerichtete Produktdifferenzierung und tragen zur Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten gegenüber Kund*innen bei, beispielsweise durch die transparente Ausweisung des konkreten CO₂-Fußabdrucks des Stromverbrauchs statt einer rein binären Kennzeichnung in „grün“ oder „nicht grün“. Gleichzeitig kann durch die erhöhte Transparenz das Vertrauen der Kund*innen gestärkt und die Kund*innenbindung verbessert werden.

Unsicherheiten bestehen hinsichtlich volatiler HKN-Preise sowie lokaler, zu geringer Marktliquidität beziehungsweise der Marktmacht einzelner Akteure. Darüber hinaus sind initiale Investitionen in Datenverarbeitung erforderlich, um die neuen Anforderungen an die Granularität der HKN zu erfüllen. Schließlich bedingt die Notwendigkeit umfassenderer Datenverarbeitung anfängliche Investitionen in Systeme und Prozesse, während die Verwaltung vieler Zertifikate in der Übergangsphase zusätzliche Komplexität sowie laufende operative Kosten verursacht.

5.2 Stromnachfrager

Industrieunternehmen

Für Industrieunternehmen ergibt sich ein wesentlicher Nutzen aus der erhöhten Nachvollziehbarkeit über die Eigenschaft, dass der tatsächlich verbrauchte Strom zu bestimmten Verbrauchszeiten aus erneuerbaren Energien stammt. Dadurch wird eine glaubwürdigere Berichterstattung (bspw. für das ESG-Reporting) ermöglicht, die zur Stärkung der Reputation beiträgt und eine effektive Bekämpfung von Greenwashing-Vorwürfen unterstützt. Industrieunternehmen leisten zudem einen sichtbaren und nachvollziehbaren Beitrag zur Energiewende, indem sie ihren Verbrauch stärker an erneuerbarer Erzeugung ausrichten. Darüber hinaus können sie durch flexiblen Verbrauch in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien Kosteneinsparungen im Vergleich zum Status Quo erzielen, indem sie von zeitweise günstigen HKN profitieren.

Den genannten Nutzenpotenzialen stehen jedoch mehrere Herausforderungen gegenüber: So besteht eine Unsicherheit durch volatile HKN-Preise, welche eine stabile wirtschaftliche Planung (bspw. zur Bewertung von Investitionen in flexiblen Verbrauch an bestimmten Unternehmensstandorten) erschwert. Hinzu kommen potenzielle Herausforderungen durch geringere Marktliquidität und Marktmacht bestimmter Akteure (bspw. kleine Stromnachfrager), insbesondere bei stark lokalem Bezug. Weiterhin werden Industrieunternehmen in hohem Maße von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien zu spezifischen Zeiten abhängig, was eine höhere Energieflexibilität (beispielsweise durch Investitionen in Batteriespeichertechnologien) industrieller Produktionsprozesse notwendig macht. Gleichzeitig zeigen aktuelle Erhebungen jedoch, dass in der energieintensiven Industrie bereits heute erhebliche Energieflexibilitätspotenziale vorhanden sind (Agora Energiewende und Agora Industrie 2024). Praxisnahe Beispiele, etwa aus der Papierindustrie, verdeutlichen die Fähigkeit energieintensiver Unternehmen, flexibel auf Preis- und Einspeisesignale zu reagieren und Lasten gezielt in Zeiten hoher Einspeisung erneuerbarer Energien zu verschieben (Agora Energiewende 2024). Dass diese Potenziale bislang nur eingeschränkt gehoben werden, liegt vor allem an regulatorischen Hemmnissen: Die bestehenden Sondernetzentgelte setzen Fehlanreize für inflexibles Verhalten und verhindern, dass Flexibilität wirtschaftlich eingesetzt werden kann (Buhl et al. 2025). Schließlich erfordert die Nutzung granularer HKN aus Sicht von Industrieunternehmen einen Integrationsaufwand in das bestehende Energiemanagement und Reporting, um neue Anforderungen adäquat abzubilden.

Private Haushalte

Auch für private Haushalte bietet der Einsatz granularer HKN vielfältigen Nutzen. So können Verbraucher*innen ihren Grünstromtarif abhängig von der tatsächlichen Stromherkunft wählen und ihren Verbrauch gezielt an die erneuerbare Erzeugung anpassen. Dadurch werden CO₂-adaptive Entscheidungen ermöglicht und der Beitrag von privaten Haushalten zum Erfolg der Energiewende sichtbar sowie nachvollziehbar. Zudem lassen sich durch einen flexiblen Verbrauch in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien Kosteneinsparungen beim Bezug von Grünstrom zu bestimmten Zeiten realisieren.

Allerdings führen volatile HKN-Preise auch (wie bereits bei anderen Stromnachfragern und -Anbietern aufgezeigt) zu wirtschaftlicher Unsicherheit. Darüber hinaus erfordert die Umsetzung erhebliche Investitionen in Mess- und IT-Infrastrukturen, wie etwa in Smart Meter oder Datenschnittstellen, deren Verfügbarkeit wiederum vom Fortschreiten des Smart-Meter-Rollouts abhängt. Die Einführung granularer Tarife bringt zudem eine komplexere Tarifstruktur für Endverbraucher*innen mit sich, was einen erhöhten Aufwand und Informationsbedarf bei der Auswahl geeigneter Tarife verursacht. Schließlich können bei der Erhebung und Nutzung sehr detaillierter Verbrauchsdaten Datenschutzbedenken auftreten.

5.3 Politik und Regulierung

EU-Kommission

Für die EU-Kommission ergibt sich ein wesentlicher Nutzen in der Verbesserung der Markteffizienz durch präzisere Preis- und Allokationssignale für die Investition in erneuerbare Energien, wodurch die Transparenz im Energiemarkt erhöht und eine effektivere und effizientere Koordinierung des Ausbaus erneuerbarer Energien ermöglicht wird. Gezielte Anreize zur Förderung erneuerbarer Energien durch entsprechende Preissignale durch granulare HKN können einen entscheidenden

Beitrag zur Erreichung europäischer Klimaziele leisten. Darüber hinaus trägt die Maßnahme zur Stärkung des Vertrauens von Stakeholdern in die Grünstromkennzeichnung und das gesamte Energiesystem bei.

Demgegenüber stehen mehrere Herausforderungen: So sind zunächst initiale Investitionen in öffentliche Dateninfrastrukturen erforderlich, um die technischen Voraussetzungen zu schaffen. Hinzu kommt ein hoher Regulierungsaufwand, der sich aus der Notwendigkeit ergibt, bestehende Gesetze, Normen und Zertifikatsrahmen anzupassen. Darüber hinaus besteht ein erheblicher Koordinationsbedarf auf EU- und nationaler Ebene, um eine Harmonisierung der internationalen Systeme zu gewährleisten. Politische Akzeptanz- und Umsetzungshürden können ebenfalls den Fortschritt verzögern. Schließlich besteht die Gefahr einer Marktfragmentierung sowie ungleicher Entwicklungen zwischen Regionen und Ländern, falls keine einheitlichen Standards etabliert werden.

BMWE

Die höhere Transparenz und Belastbarkeit granularer HKN stärken nicht nur das Vertrauen von Verbraucher*innen, Unternehmen und Investoren in Grünstromprodukte, sondern erhöhen auch die Glaubwürdigkeit politischer Maßnahmen. Förderprogramme, Anreizsysteme oder Berichtspflichten, deren Wirkung auf Basis granularer HKN belegt werden kann, sind weniger angreifbar für Greenwashing-Vorwürfe und gewinnen so an politischer und gesellschaftlicher Legitimität. Gleichzeitig setzen granulare HKN durch räumlich und zeitlich differenzierte Preissignale gezielte Investitionsanreize in Regionen mit bislang unzureichender Erzeugung aus erneuerbaren Energien oder Flexibilitätspotenzialen. So fördern sie die effiziente Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem und können durch eine bessere Synchronisierung von Erzeugung und Verbrauch den Bedarf an Redispatch und Netzausbau langfristig verringern und somit einen Beitrag zur Senkung der Systemkosten leisten. Statt wie bisher Kapital durch den Import nicht-granularer HKN ohne zusätzlichen und effizienten Ausbau erneuerbarer Energien einzusetzen, lenken granulare HKN dieses Geld gezielt in den Ausbau erneuerbarer Energien, in Speichertechnologien und in flexiblen Verbrauch. Damit können granulare HKN zu einem zentralen, marktisierten Koordinierungsinstrument der Energiewende werden, das die zielgerichtete Dekarbonisierung in Deutschland und Europa vorantreibt und zugleich ökologische Wirksamkeit mit ökonomischer Effizienz verbindet. Ein weiterer Vorteil liegt in der hohen Anschlussfähigkeit granularer HKN an bestehende Marktstrukturen. Anders als derzeit diskutierte Alternativen – etwa das Gebotszonensplitting – erfordert ihre Einführung keine grundlegende Reform der Marktmechanismen. Dadurch lassen sich Kosten und Zeit bei der Implementierung deutlich reduzieren.

Die Herausforderungen bestehen vor allem in den initialen Investitionen in eine öffentliche Dateninfrastruktur, die für die Umsetzung erforderlich ist. Hinzu kommen Anforderungen an die Datensicherheit und den Datenschutz, insbesondere im Hinblick auf die DSGVO-Konformität bei der Erhebung und Verarbeitung präziser Messdaten. Zudem kann es zu (kurzfristigen) Wettbewerbsnachteilen für deutsche Unternehmen kommen, etwa durch volatile und lokal erhöhte HKN-Preise. Ebenso wie auf europäischer Ebene besteht auch hier die Gefahr von Marktfragmentierung und regionalen Ungleichheiten, wenn Harmonisierung und Koordination nicht ausreichend gewährleistet werden.

BMUKN & UBA

Für das BMUKN sowie das UBA bietet die Einführung granularer HKN maßgeblich zwei Nutzenaspekte: Zum einen entsteht eine bessere Datengrundlage für umweltökonomische Bewertungen des Energiesektors, was fundiertere politische und regulatorische Entscheidungen ermöglicht. Zum anderen wird durch die Digitalisierung der relevanten Prozesse von der Registrierung der Anlagen, über die Verifizierung und den Handel der HKN, bis hin zur Entwertung der HKN, eine höhere Automatisierung und damit verbundene Effizienz- und Kostenvorteile des HKNR bei gleichzeitiger Steigerung der Datenqualität und Verringerung der Fehleranfälligkeit erreicht.

Bei den Herausforderungen sind zunächst initiale Investitionen in die Register-Infrastruktur des UBA zu nennen, um die technischen Voraussetzungen zu schaffen. Darüber hinaus hängt die Datenqualität stark von der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Markakteure ab. Eine weitere Herausforderung liegt in der Validierung von Daten und deren Vollständigkeit, da fehlerhafte oder unvollständige Emissionsdaten aufgrund der steigenden Systemkomplexität insbesondere in der Transformationsphase zu granularen HKN das Gesamtsystem beeinträchtigen könnten.

5.4 Gesellschaft und Umwelt

Umweltverbände

Für Umweltverbände liegt der Nutzen granularer HKN vor allem darin, dass diese einen Beitrag zur wirtschaftlich tragfähigen Dekarbonisierung des Energiesektors leisten können. Durch eine genauere zeitliche und räumliche Zuordnung der Stromherkunft wird die Transparenz und Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten deutlich erhöht. Dadurch entsteht die Möglichkeit, glaubwürdigere Grünstromprodukte zu fördern und Verbraucher*innen sowie Unternehmen verlässliche Informationen über die tatsächliche Herkunft des genutzten Stroms bereitzustellen.

Gleichzeitig besteht jedoch die Herausforderung, dass die Systeme in der Transformationsphase zu granularen HKN potenziell intransparent und komplex werden können. Diese Komplexität kann nicht nur die Nachvollziehbarkeit für Verbraucher*innen, sondern auch die Kommunikation von Umweltverbänden erschweren, die auf klare und überprüfbare Daten angewiesen sind, um eine glaubwürdige Bewertung von Grünstromprodukten vorzunehmen.

Verbraucherorganisationen

Für Verbraucherorganisationen bietet die Einführung granularer HKN vielfältigen Nutzen. So können Grünstromtarife künftig stärker von der tatsächlichen Stromherkunft abhängen, wodurch sich der Verbrauch gezielter an der erneuerbaren Erzeugung ausrichten lässt. Auf diese Weise werden CO₂-adaptive Entscheidungen ermöglicht, die einen sichtbaren und nachvollziehbaren Beitrag zur Energiewende leisten. Darüber hinaus eröffnet ein flexibler Verbrauch in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien Potenziale für Kosteneinsparungen im Vergleich zum Status Quo. Ein weiterer Vorteil liegt in der Erhöhung der Transparenz und Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten, wodurch Verbraucher*innen künftig glaubwürdigere und nachvollziehbarere Grünstromangebote erhalten können.

Auch für Verbraucherorganisationen stehen dem Nutzenpotenzial einige Herausforderungen gegenüber: So besteht die Befürchtung steigender und volatiler Grünstrompreise für

Verbraucher*innen, die nicht flexibel agieren (können), was insbesondere eine potenzielle Benachteiligung einkommensschwächerer Haushalte nach sich ziehen könnte. Hinzu kommen Herausforderungen durch geringere Marktliquidität und Marktmacht bestimmter Akteure, insbesondere bei kleineren, regionalen Märkten mit geringerem Angebot an erneuerbaren Energien. Darüber hinaus besteht das Risiko von Intransparenz durch zu komplexe Systeme, was wiederum zu höheren Beratungskosten zur Erläuterung des Systems gegenüber Stromverbraucher*innen führen kann. Schließlich besteht die Gefahr von Greenwashing, wenn durch die Komplexität der Nachweisführung in der Transformationsphase zu granularen HKN die Nachvollziehbarkeit für Endkund*innen erschwert wird.

6. Fazit

Das bestehende deutsche HKN-System erfüllt zwar die derzeitigen gesetzlichen Anforderungen an die Kennzeichnung von Grünstrom, weist jedoch grundlegende strukturelle Schwächen auf: Die zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch sowie die daraus resultierenden fehlenden ökonomischen Anreize für den zielgerichteten Zubau von flexibler Erzeugung und Verbrauch führen dazu, dass HKN bislang kaum einen Beitrag zur effizienten Integration von erneuerbaren Energien und damit dem Voranschreiten der Energiewende in Deutschland und Europa leisten. Insbesondere der verbreitete Import günstiger, nicht-granularer HKN ohne zeitliche und räumliche Kopplung an die tatsächliche Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien ermöglicht zwar eine rechnerische „Grünstellung“ des Stromverbrauchs, trägt jedoch nur eingeschränkt zur Dekarbonisierung in Europa bei und führt dazu, dass keine zusätzlichen und effizienten Investitionen in erneuerbare Erzeugung, Flexibilität und Speicher angereizt werden. Somit entsteht eine systemische Ineffizienz, da eigentlich sinnvolle Investitionen nicht gehoben werden und Anreize fehlen.

Granulare HKN adressieren dieses Effizienzproblem unmittelbar. Durch ihre höhere zeitliche und räumliche Auflösung ermöglichen sie eine präzise Zuordnung von Erzeugung und Verbrauch und schaffen so Transparenz über den tatsächlichen Beitrag von Grünstromprodukten zur Dekarbonisierung. Darüber hinaus erhöhen sie die systemische Effizienz, indem sie Preissignale dort wirksam werden lassen, wo sie volkswirtschaftlich den größten Nutzen stiften – etwa durch die gezielte Allokation von Investitionen in flexible Lasten, Speicherkapazitäten und erneuerbare Erzeugung. Sie stärken das Vertrauen von Verbraucher*innen, Unternehmen und Investoren, ermöglichen bessere Entscheidungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Präferenzen und verbinden damit ökologische Zielsetzungen mit ökonomischer Rationalität. Gleichzeitig bieten granulare HKN auch politisch einen entscheidenden Vorteil: Da ihre Wirkung auf Dekarbonisierung und Effizienzsteigerung nachvollziehbar belegt werden kann, erhöhen sie die Legitimität politischer Maßnahmen und reduzieren die Anfälligkeit für Greenwashing-Vorwürfe.

Damit granulare HKN ihre volle Wirkung entfalten können, bedarf es eines klar definierten, langfristigen Transformationspfads. Dieser sollte regulatorische Planungssicherheit schaffen, den Markthochlauf durch positive Anreize unterstützen und die Nutzung granularer HKN eng mit bestehenden Instrumenten wie beispielsweise individuellen Netzentgelten, der THG-Quote oder netzdienlichen Vergütungsmechanismen verknüpfen. Technisch ist eine flächendeckende Smart-Meter-Infrastruktur die Voraussetzung, um Erzeugung und Verbrauch in kurzen Intervallen erfassen zu können. Parallel dazu muss das HKNR weiterentwickelt werden, um granulare Zeit-

und Ortsdaten verarbeiten kann. Eine enge Kopplung mit dem MaStR würde zusätzlich Prozesse vereinfachen, Systemkosten senken und den administrativen Aufwand reduzieren.

Granulare HKN können die bisherige rein bilanzielle Kennzeichnung von Grünstrom zu einem zentralen, marktbasierter Koordinierungsinstrument der Energiewende weiterentwickeln. Sie verbinden Transparenz und Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten mit marktwirtschaftlicher Effizienz und schaffen so die Grundlage für eine gezielte, transparente und wirtschaftlich tragfähige Dekarbonisierung des Energiesystems. Mit einem klaren politischen Rahmen, technischer Interoperabilität und einem schrittweisen, verlässlichen Rollout kann Deutschland eine Vorreiterrolle bei der Einführung granularer HKN übernehmen und die Energiewende auf eine neue, datenbasierte Stufe der Transparenz, Effizienz und Wirksamkeit heben.

Die erfolgreiche Implementierung granularer HKN erfordert dabei die Bewältigung zentraler Herausforderungen, die über die technische und regulatorische Machbarkeit hinausgehen. Konkrete Gestaltungsfragen zum Umgang mit Preisvolatilität und zur konsistenten Verzahnung mit bestehenden Dekarbonisierungsinstrumenten müssen beantwortet werden: Es bedarf zielgerichteter Forschung beispielsweise hinsichtlich des Umgangs mit zeit- und ortsabhängigen Preissignalen sowie dem Zusammenspiel granularer HKN und dynamischer Netzentgelte. Zudem sollte die Transformation langfristig kommuniziert und schrittweise umgesetzt werden, um die Planungssicherheit und Akzeptanz betreffender Stakeholder zu erhöhen: Nur durch einen transparenten, langfristigen Transformationspfad mit sukzessive verstärkter Anreizsetzung lassen sich Übergangskosten minimieren, die Akzeptanz stärken und Fehlentwicklungen rechtzeitig korrigieren.

Anhang A: Abbildungen der Bedienmaske des HKNR

Herkunfts nachweise übertragen

Herkunfts nachweise übertragen an die Firma: **MusterFirma 1**

Suchen

#	Funktion	Firmenname	Aktenzeichen	Straße(Büro)	Hausnummer(Büro)	Postleitzahl	Ort(Büro)	Status
Übernehmen	Anlagenbetreiber	MusterFirma 1	72 230/449	Wörlitzer Platz	1	06844	Dessau-Roßlau	aktiv
Übernehmen	Händler	MusterFirma 1	72 230/449	Wörlitzer Platz	1	06844	Dessau-Roßlau	aktiv
Übernehmen	Elektrizitätsversorger	MusterFirma 1	72 230/449	Wörlitzer Platz	1	06844	Dessau-Roßlau	aktiv

Seite 1 von 1 (3 Elemente) **1** **Seitengröße: 10**

Herkunfts nachweise übertragen

#	Kontoname	entwertbare HKN	Anlagen typ	Nachweistyp	Konto-Status
AnlagenbetreiberKonto	53	Photovoltaik	HKN	Aktiv	

Summe = 53

Seite 1 von 1 (1 Elemente) **1** **Seitengröße: 10**

Zielkonto **MusterFirma 1 (Elektrizitätsversorger)**

von (Unter-) Konto

Internat. Anlagen kennung

Anlagen name

Bundesland

Qualitätsmerkmal

Anlagen typ

Kopplung

Förderungsart

Produktionsmonat von* **Januar 2022**

Produktionsmonat bis* **Dezember 2022**

Anzeigebau auswählen* **Anzeigebau 1 - Gruppierung**

Suchen

Bitte tragen Sie für einen Betrag für die HKN ein.

Anlagen typ	Förderungsart	Qualitätsmerkmal	übertragbare HKN	zu transferierende HKN
Photovoltaik	Keine Forderung	HKN	23	10

Summe = 23 Summe = 10

Transfertext

Abbrechen **TAN anfordern** **Tan** **weitstellen**

Anhang B: Weiterführende Reformvorschläge

Themenbereich	Herausforderung	Lösungsansatz	Beispielhafte Quellen
Zertifikatsgröße	Zertifikatsgröße von 1 MWh verhindert Teilnahme kleinerer Anlagen am HKN-System	Reduzierung der Zertifikatsgröße zur Integration kleinerer Anlagen	FfE (2023)
Energie-flexibilität	HKN berücksichtigen keine Anreize für Energieflexibilität	Dokumentierung von Speichern und Lastverschiebungen in HKN	EnergyTag (2023)
Doppelver- marktung	EEG-geförderte Anlagen sind vom HKN-System ausgeschlossen	Abschaffung des Doppelvermarktungs-verbots und Hebung von Erlösen	dena (2022)
Eigenverbrauch	Unternehmen können Dekarbonisierungsmaßnahmen nur nach Prüfung durch Umweltgutachten extern berichten	Einführung von HKN für den Eigenverbrauch von Unternehmen	dena (2022)
Zusatz- informationen	HKN differenzieren lediglich zwischen „grün“ und „nicht-grün“	Einbezug von Informationen wie CO ₂ -Intensität in HKN	Energy Track and Trace (2022)
Entwertungs- rechte	Bisher können nur EVU HKN entwerten lassen	Einführung von Entwertungsrechten für Unternehmen, z. B. im Rahmen von Dekarbonisierungszielen	dena (2022)

Anhang C: Übersicht der Nutzenargumentation

	Stakeholder	Nutzen	Herausforderung
Stromanbieter	Anlagenbetreiber	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhere Wertschöpfung durch gezielte Vermarktung von Grünstrom mit hohem Qualitätsmerkmal (zeitlich/örtlich) ▪ HKN-Preise setzen gezielte Investitionsanreize in die netzdienliche Integration von erneuerbaren Energien ▪ Zeitersparnis bei Übertragung von HKN durch Ende-zu-Ende Digitalisierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unsicherheit durch volatile HKN-Preise ▪ Risiko, dass nicht genügend Nachfrage für Grünstromprodukte mit granularen HKN besteht ▪ Skaleneffekte schwierig für kleine Anlagen (hoher Fixaufwand)
	Stromhändler	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neue Geschäftsmodelle durch Handel mit granularen HKN; Möglichkeit zur Produktdifferenzierung (z. B. durch die transparente Ausweisung des konkreten CO₂-Fußabdrucks des Stromverbrauchs statt einer rein binären Kennzeichnung in „grün“ oder „nicht grün“) <ul style="list-style-type: none"> ➔ Ermöglichung glaubwürdigerer Grünstromprodukte gegenüber EVU ▪ Zeitersparnis bei Übertragung von HKN durch Ende-zu-Ende Digitalisierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unsicherheit durch volatile HKN-Preise ▪ Risiko, dass nicht genügend Nachfrage für Grünstromprodukte mit granularen HKN besteht ▪ Komplexität in der Verwaltung vieler granularer Zertifikate in der Transformationsphase zu granularen HKN ▪ Hohe Anforderungen an Systemintegration, Datenhandling und IT-Sicherheit
	EVU	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neue Geschäftsmodelle durch Handel mit granularen HKN; Möglichkeit zur Produktdifferenzierung (z. B. durch die transparente Ausweisung des konkreten CO₂-Fußabdrucks des Stromverbrauchs statt einer rein binären Kennzeichnung in „grün“ oder „nicht grün“) <ul style="list-style-type: none"> ➔ Ermöglichung glaubwürdigerer Grünstromprodukte gegenüber Kund*innen ▪ Stärkung des Vertrauens der Kund*innen durch höhere Transparenz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unsicherheit durch volatile HKN-Preise ▪ Risiko, dass nicht genügend Nachfrage für Grünstromprodukte mit granularen HKN besteht ▪ Durch lokalen Bezug ggf. Herausforderungen durch geringere Marktliquidität und Marktmacht bestimmter Akteure ▪ Initiale Investitionen für Datenverarbeitung bei granularen HKN ▪ Komplexität in der Verwaltung vieler granularer Zertifikate in der Transformationsphase zu granularen HKN ▪ Hohe Anforderungen an Systemintegration, Datenhandling und IT-Sicherheit

Anhang C: Übersicht der Nutzenargumentation (fortgesetzt)

Stromnachfrager	Industrieunternehmen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachvollziehbarkeit, dass Strom tatsächlich zu Verbrauchszeiten aus erneuerbaren Energien stammt <ul style="list-style-type: none"> ➔ Glaubwürdigere Berichterstattung; Reputation durch effektive Bekämpfung von Greenwashing-Vorwürfen ▪ Möglichkeit finanziell von volatilen HKN-Preisen zu profitieren ▪ Beitrag zu Energiewende sichtbar und nachvollziehbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unsicherheit durch volatile HKN-Preise ▪ Durch lokalen Bezug ggf. Herausforderungen durch geringere Marktliquidität und Marktmacht bestimmter Akteure ▪ Abhängigkeit von Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien zu spezifischen Zeiten <ul style="list-style-type: none"> ➔ Produktionsplanungsherausforderungen ▪ Bedarf an Integrationsaufwand in das Energiemanagement und Reporting
	Private Haushalte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachvollziehbarkeit, dass Strom tatsächlich zu Verbrauchszeiten aus erneuerbaren Energien stammt <ul style="list-style-type: none"> ➔ Ermöglichung CO₂-adaptiver Entscheidungen ▪ Möglichkeit finanziell von volatilen HKN-Preisen zu profitieren ▪ Beitrag zu Energiewende sichtbar und nachvollziehbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unsicherheit durch volatile HKN-Preise ▪ Notwendigkeit von Investitionen in Mess- & IT-Infrastruktur (z. B. Smart Meter, Home-Energy-Management-Systemen) <ul style="list-style-type: none"> ➔ Abhängigkeit von Voranschreiten des Smart Metern Rollouts ▪ Komplexe Tarifstruktur für Endverbraucher <ul style="list-style-type: none"> ➔ Aufwand / Informationsbedarf zur Auswahl sinnvoller Tarife ▪ Datenschutzbedenken bei granularen Messdaten
Politik/Regulierung	EU-Kommission	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehr Transparenz im Energiemarkt; bessere Koordinierung des Ausbaus erneuerbarer Energien <ul style="list-style-type: none"> ➔ Beitrag zur Erreichung europäischer Klimaziele durch gezielte Anreize ➔ Stärkung des Vertrauens von Stakeholdern des Energiesystems in die Grünstromkennzeichnung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Initiale Investitionen in öffentliche Dateninfrastruktur notwendig ▪ Hoher Regulierungsaufwand (Gesetze, Normen, Zertifikatsrahmen) ▪ Koordinationsbedarf auf EU- und nationaler Ebene (Harmonisierung) ▪ Politische Akzeptanz und Umsetzungshürden ▪ Gefahr von Marktfragmentierung und Ungleichheiten zwischen Regionen und Ländern

Anhang C: Übersicht der Nutzenargumentation (fortgesetzt)

BMWE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung von Anreizen für zusätzlichen und effizienten Ausbau von erneuerbaren Energien sowie flexiblem Verbrauch <ul style="list-style-type: none"> ➔ Effektiver Beitrag zur Erreichung nationaler Klimaziele ➔ Senkung der Systemkosten durch potenziell geringeren Bedarf an Redispatch und Netzausbau ➔ Kann perspektivisch veraltete, ineffiziente und komplexe alternative Instrumente ablösen ▪ Mehr Transparenz und Glaubwürdigkeit für politische Maßnahmen, deren Wirkung durch granulare HKN nachvollziehbar und belastbar belegt werden kann <ul style="list-style-type: none"> ➔ Politische Maßnahmen sind weniger angreifbar für Greenwashing-Vorwürfe ▪ Anders als derzeit diskutierte alternative Instrumente (bspw. Gebotszonensplitting), keine grundsätzliche Reform zugrundeliegender (Markt-)mechanismen <ul style="list-style-type: none"> ➔ Kosten- und Zeitersparnis bei der Einführung eines effektiven und effizienten Instruments zur Koordinierung der Energiewende ▪ Stärkung der deutschen Position im Bereich energiewirtschaftlicher Datenanalyse <ul style="list-style-type: none"> ➔ Neue Geschäftsmodelle auf Basis granularer Verbrauchs- und Einspeisedaten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Initiale Investitionen in öffentliche Dateninfrastruktur notwendig ▪ Sicherstellung von Datensicherheit, Datenschutz (z. B. DSGVO-Konformität) ▪ Gefahr von (kurzfristigen) Wettbewerbsnachteilen für deutsche Unternehmen durch volatile und lokal erhöhte HKN-Preisen ▪ Gefahr von Marktfragmentierung und Ungleichheiten zwischen Regionen
BMUKN & UBA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bessere Datengrundlage für umweltökonomische Bewertungen des Energiesektors ▪ Automatisierung und Zukunftsfähigkeit des HKNR <ul style="list-style-type: none"> ➔ Kostenersparnis im Betrieb des HKNR 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Initiale Investitionen in Register-Infrastruktur (UBA) ▪ Abhängigkeit von Datenqualität der Marktteure; Herausforderung der Validierung von Daten ▪ Risiko unvollständiger oder fehlerhafter Emissionsdaten durch Systemkomplexität in der Transformationsphase zu granularen HKN

Anhang C: Übersicht der Nutzenargumentation (fortgesetzt)

Gesellschaft /Umwelt	Umweltverbände	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulare HKN können zur wirtschaftlich tragfähigen Dekarbonisierung des Energiesektors beitragen ▪ Erhöhung der Transparenz und Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefahr, dass Systeme in der Transformationsphase zu intransparent und komplex werden
	Verbraucherorganisationen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifwahl abhängig von tatsächlicher Stromherkunft; potenzielle Anpassung des Verbrauchs an Erzeugung erneuerbare Energien <ul style="list-style-type: none"> ➔ Ermöglichung CO₂-adaptiver Entscheidungen; Beitrag zu Energiewende sichtbar und nachvollziehbar ▪ Möglichkeit finanziell von volatilen HKN-Preisen zu profitieren ▪ Erhöhung der Transparenz und Glaubwürdigkeit von Grünstromprodukten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Befürchtung steigender und volatiler Grünstrompreise für Verbraucher <ul style="list-style-type: none"> ➔ Potenzielle Benachteiligung einkommensschwacher Haushalte ▪ Durch lokalen Bezug ggf. Herausforderungen durch geringere Marktliquidität und Marktmacht bestimmter Akteure ▪ Risiko von Intransparenz durch zu komplexe Systeme in der Transformationsphase <ul style="list-style-type: none"> ➔ Höhere Beratungskosten für Stromverbraucher

Literaturverzeichnis

- 24/7 Hub (2023): LichtBlick, 50Hertz and Granular Energy start pilot project for more transparency in green electricity - 24/7 Hub. Online verfügbar unter https://www.50hertz.com/Portals/1/Dokumente/Medien/Pressemitteilungen/2023/20230505_Herkunfts nachweise_EN.pdf?ver=7SDIBJilrs6ps8D3tldlxw%3D%3D, zuletzt aktualisiert am 11.05.2023, zuletzt geprüft am 10.09.2025.
- Agora Energiewende; Agora Industrie (2024): Stellungnahme zum Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich. Online verfügbar unter https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2024/2024-19_DE_IND_Reform_Industrielle_Netzentgelte/Stellungnahme_Industrielle_Netzentgelte_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2025.
- Agora Energiewende; Agora Industrie; FIM; RAP (2024): Industrielle Energieflexibilität ermöglichen. Online verfügbar unter https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2024/2024-19_DE_IND_Reform_Industrielle_Netzentgelte/A-IND_350_Industrielle_Energieflexibilit%C3%A4t_Impuls_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2025.
- Bengart, Paul; Vogt, Bodo (2021): Fuel mix disclosure in Germany—The effect of more transparent information on consumer preferences for renewable energy. In: *Energy Policy* 150, S. 112120. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.112120.
- BNetzA (2025): Diskussionspapier Entgelte für Industrie und Gewerbe. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2025/GBK-25-01-1%233_AgNes/Downloads/GBK-25-01-1%233_Diskussionspapier_Konsultation.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 30.09.2025.
- Buhl, Hans Ulrich; Eble, Dominik; Pichlmeier, Markus; Bockhacker, Tilman; Eiser, Niklas (2025): Vorschläge für eine systemdienliche Weiterentwicklung der atypischen Netznutzung in der deutschen Stromnetzentgeltsystematik. In: *Z Energiewirtsch* 49 (S2), S. 4–33. DOI: 10.1007/s12398-025-1330-8.
- dena (2022): Herkunfts nachweise als Wertkomponente nutzen! Ein Impuls der Marktoffensive Erneuerbare Energien zur Weiterentwicklung des HKN-Systems. Deutsche Energie-Agentur. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/20221222_Positionspapier_Weiterentwicklung_HKN_System_Lektoriert_v1.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2025.
- dena (2025): Digitale Identitäten im Energiesektor - Ein Beitrag für eine zukunftsgerichtete Dateninfrastruktur. Unter Mitarbeit von Matthias Babel, Felix Paetzold, Tobias Ströher, Jens Strüker, Linda Babilon, Irene Adamski et al. Deutsche Energie-Agentur. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2025/Digitale_Identitaeten_im_Energiesektor.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

Energy Track and Trace (2022): Architectural concepts and insights. Greenpaper Version 1.0.

Online verfügbar unter <https://energytrackandtrace.azurewebsites.net/wp-content/uploads/2023/11/2022-05-Paper-Architectural-concepts-and-insights.pdf>, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

EnergyTag (2023): EnergyTag-Whitepaper. Accelerating the transition to 24/7 clean power.

Online verfügbar unter <https://energytag.org/wp-content/uploads/2023/09/EnergyTag-Whitepaper.pdf>, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

EnergyTag (2025): EnergyTag Accredits First Granular Certificate Issuers, Marking a Major Milestone for Hourly Clean Energy Tracking • EnergyTag. Unter Mitarbeit von Killian Daly. Online verfügbar unter <https://energytag.org/energytag-accredits-first-granular-certificate-issuers-marking-a-major-milestone-for-hourly-clean-energy-tracking/>, zuletzt aktualisiert am 21.07.2025, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

ESB (2024): ESB announces pilot with Granular Energy to help organisations reporting on Guarantee of Origin energy certificates. Online verfügbar unter <https://esb.ie/media-centre-news/press-releases/article/2024/07/16/esb-announces-pilot-with-granular-energy-to-help-organisations-reporting-on-guarantee-of-origin-energy-certificates>, zuletzt aktualisiert am 11.09.2025, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

Europäische Kommission (2023): Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj?locale=de>, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

EWI & BET (2025): Energie. Effizient. Machen. Monitoringbericht zum Start der 21. Legislaturperiode, im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energiewende-effizient-machen.pdf?__blob=publicationFile&v=20, zuletzt geprüft am 19.09.2025.

Feldhaus, Christoph; Gleue, Marvin; Löschel, Andreas; Weidenbrner, Vincent (2022): On the determinants of regional sustainable electricity consumption. Individual preferences and regional co-benefits. In: *Die Unternehmung* 76 (3), S. 338–359. Online verfügbar unter <https://www.jstor.org/stable/27295527>.

FfE (2023): Zukunftsfähige Herkunftsnnachweise - Roadmap zur Weiterentwicklung. Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2023/05/Zukunftsfaehige_Herkunftsnnachweise_Roadmap_zur_Weitereentwicklung.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

FÖS (2025): Impulspapier im Auftrag der Aktionsgemeinschaft Soziale Marktwirtschaft. Die Auswirkungen des Herkunftsnnachweissystems – Transformationsbeitrag oder systematisches Greenwashing? Unter Mitarbeit von Marie Wettingfeld, Swantje Fiedler und Hana van Loock. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft. Online verfügbar unter <https://foes.de/publikationen/2025/2025>

07_FOES_ASM_HKN_Impulspapier_Herkunfts nachweise_Analyse_Greenwashing_oder_T
ransformation.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

Granular Energy (2024a): ESB announces pilot with Granular Energy to help organisations reporting on Guarantee of Origin energy certificates. Online verfügbar unter <https://www.granular-energy.com/insights/esb-announces-pilot-with-granular-energy>, zuletzt aktualisiert am 10.09.2025, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

Granular Energy (2024b): Granular Energy and VUE naturemade launch pilot project for enhanced transparency and sub-hourly matching in Switzerland. Online verfügbar unter <https://www.granular-energy.com/insights/granular-energy-and-vue-naturemade-hourly-matching-project-in-switzerland>, zuletzt aktualisiert am 10.09.2025, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

IEA (2023): CO2 Emissions in 2022. International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

IPCC (2023): IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Hoesung Lee, Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne et al. Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf, Schweiz.

Jokumsen, Morten; Pedersen, Torben Pryds; Daugaard, Martin Schmidt; Tschudi, Daniel; Madsen, Mikkel Wienberg; Wisbech, Thomas (2023): Verifiable proofs for the energy supply chain: small proofs brings you a long way. In: *Energy Informatics* 6 (1), S. 28. DOI: 10.1186/s42162-023-00283-2.

Körner, Marc-Fabian; Paetzold, Felix; Ströher, Tobias; Strüker, Jens (2024): Digital Proofs of Origin for Sustainability: Assessing a Digital Identity-Based Approach in the Energy Sector. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/d1e60b7c-c8bc-453f-8673-9c61f33a7769>, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

Körner, Marc-Fabian; Paetzold, Felix; Ströher, Tobias; Strüker, Jens (2025): Feingranulare und digitale CO2-Herkunfts nachweise für Strom. In: *Digitale Identitäten und Nachweise: Lösungsansätze für vertrauenswürdige Interaktionen zwischen Menschen, Unternehmen und Verwaltung*: Springer Fachmedien Wiesbaden Wiesbaden, S. 237–250.

NESO (2025): 24/7 CFE Trading. Implications of Trading of 24/7 Carbon Free Energy (CFE) on Electricity System Operation. National Energy System Operator. Online verfügbar unter <https://www.neso.energy/document/365496/download>, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

Piper, Alex (2025): Californian Regulators Approve Hourly Power Source Disclosure • EnergyTag. Online verfügbar unter <https://energytag.org/californian-regulators-approve-hourly-power-source-disclosure/>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2025, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

Riepin, legor; Brown, Tom (2024): On the means, costs, and system-level impacts of 24/7 carbon-free energy procurement. In: *Energy Strategy Reviews* 54, S. 101488. DOI: 10.1016/j.esr.2024.101488.

Ströher, Tobias; Strüker, Jens (2025): Power Flow Tracing: Analyzing the Embedding of Elektro-Dakar in Research and Practice. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/ea5cf911-d8da-496b-bdb2-31cd82297f48>, zuletzt geprüft am 11.09.2025.

UBA (2019): Das Herkunftsnnachweisregister für Strom aus erneuerbaren Energien (HKNR) im Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/herkunftsnnachweisregister_20190715.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

UBA (2023): Übertragung und Export von Herkunftsnnachweisen. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/20230601_kurzanleitung_uebertragung_hkn.pdf, zuletzt geprüft am 30.09.2025.

UBA (2025): Häufig gestellte Fragen. Häufig gestellte Fragen und Antworten zum Herkunfts- und Regionalnachweisregister, Ökostrom und Stromkennzeichnung. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/fragen_antworten_hknr_rnr_oekostrom_skz.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2025.