



# Zukunftsfähige Herkunftsnachweise

## Konzept für die Ende-zu-Ende-Digitalisierung

---

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Stiftung  
Umweltenergierecht



UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

2023



# Zukunftsfähige Herkunftsnachweise

---

Konzept für die Ende-zu-Ende-  
Digitalisierung

**Herausgeber:**



Am Blütenanger 71, 80995 München  
+49 89 158121-0

Mail: [info@ffe.de](mailto:info@ffe.de)

Web: [www.ffe.de](http://www.ffe.de)

Bericht zum Projekt: InDEED  
Zukunftsfähige Herkunftsnachweise  
Konzept für die Ende-zu-Ende-Digitalisierung

**Veröffentlicht am:**

09.05.2023

**Autor:innen:**

Alexander Bogensperger  
Simon Koderer  
Severin Sylla  
Joachim Ferstl  
Andreas Bruckmeier  
Michael Hinterstocker  
Simon Mertel (Universität Bayreuth)

**Projektpartner:**

Universität Bayreuth  
Stiftung Umweltenergierecht

**Förderkennzeichen:**

03EI6026A

03EI6026B

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhalt

1	Einleitung .....	7
2	Herkunftsnachweise .....	8
2.1	Status Quo .....	8
2.2	Notwendigkeit einer Überarbeitung .....	9
2.3	Anforderungen an eine neue Lösung .....	11
3	Lösungsvorschlag .....	12
3.1	High-Level-Beschreibung .....	12
3.2	Prozesse und Abläufe und Einordnung ins aktuelle Herkunftsnachweissystem .....	14
4	Anwendungsfälle der Labeling-Lösung .....	19
4.1	Individuelle Stromherkunft .....	19
4.2	Energy Communities und lokale Strommärkte .....	19
4.3	Treibhausgas-Vorhersage und -Nachweis .....	20
4.4	Speicher-Labeling .....	20
4.5	Aggregation von Kleinanlagen für die Teilnahme am Herkunftsnachweisregister .....	21
5	Proof of Concept und Praxistauglichkeit .....	22
5.1	Proof of Concept .....	22
5.2	Umfang des Feldtests .....	22
5.3	Ergebnisse des Feldtest .....	23
6	Wertversprechen der entwickelten Lösung .....	24
7	Einsatz der Blockchain Technologie .....	26
8	Fazit und Ausblick .....	28
	Abkürzungsverzeichnis .....	31
	Literaturverzeichnis .....	33
9	Anhang .....	35
9.1	Prozesse im aktuellen HKN-System in Deutschland .....	35



# 1 Einleitung

Das Wissen um die Herkunft von Strom nimmt an Bedeutung zu. Gestiegenes Bewusstsein für Nachhaltigkeit spielt dabei ebenso eine Rolle wie die verpflichtende Nachhaltigkeitsberichterstattung (Corporate Sustainability Reporting) für bis zu 15.000 deutsche Unternehmen oder die für die Energiewende nötige Sektorenkopplung (vgl. grüne Mobilität, Wasserstoff oder Wärme).

Um die Stromherkunft heute nachzuweisen, wurde im Jahr 2013 das Herkunftsnachweisregister (HKNR) geschaffen [18]. Das System der Herkunftsnachweise (bestehend aus der Gesetzgebung und der praktischen Umsetzung) steht jedoch in der Kritik, da der Einfluss von Herkunftsnachweisen (HKN) auf die Energiewende nicht gegeben ist. Auch Kleinanlagen können am System nur begrenzt teilnehmen, da HKN auf eine Megawattstunde begrenzt und die Prozesse aufwendig, wenig automatisiert und damit teuer sind.

Zwar dürfen Anlagen, die eine Förderung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erhalten, bisher keine HKN beantragen – insbesondere für den Weiterbetrieb von Kleinanlagen nach dem Auslaufen der Förderung wäre dies jedoch wichtig. Auch die von der EU geforderte Einführung von Bürger- und Erneuerbare Energiegemeinschaften (RED II und IEMD) macht es nötig, die Stromherkunft aus kleinen Anlagen nachzuweisen und den Nachweis deutlich zu vereinfachen.

Eine Zusammenfassung der Kritik am HKN-System, bereits unterbreitete Lösungsvorschläge sowie eine Roadmap, wie das HKNR weiterentwickelt werden kann, sind in der Studie „Zukunftsfähige Herkunftsnachweise – Roadmap zur Weiterentwicklung“ [17] zu finden.

In diesem Whitepaper wird die Lösung aus dem Projekt InDEED (FKZ: 03EI6026A) vorgestellt, die es ermöglichen soll, die Stromherkunft aus Kleinanlagen<sup>1</sup> unkompliziert gegenüber Letztverbrauchern auszuweisen. Dabei ist es nicht mehr nötig, die Anlagen über das HKNR zu führen. Mittels moderner kryptographischer Methoden wird es möglich, die Einhaltung von Regeln und die Richtigkeit des Nachweises z. B. durch einen Lieferanten oder Energiedienstleister zu bestätigen. Die Lösung zeigt, was mit einer intelligenten Ende-zu-Ende Digitalisierung realisierbar ist, eröffnet völlig neue Möglichkeiten der Interaktion und bereitet den Weg für neue Geschäftsmodelle und Produkte – weit über die Stromkennzeichnung hinaus.

---

<sup>1</sup> Darunter subsumieren wir Anlagen unter 30 kWp installierter Leistung

## 2 Herkunftsnachweise

HKN sind ein elementarer Bestandteil der Energiewende. Solange der Strommix noch nicht vollständig grün ist, werden sie benötigt, um die grüne Eigenschaft von Strom gegenüber Verbrauchern nachzuweisen. Sie sind die Grundlage für Grünstromprodukte, grünen Wasserstoff, grüne Wärme und nachhaltige Produktion und sollen damit einen Beitrag zur Energiewende leisten. Sie werden in Energiegemeinschaften benötigt, bilden die Grundlage für die marktbasiertere Emissionen von Unternehmen und verschaffen in einer Zeit mit gestiegenem Umweltbewusstsein einen Wettbewerbsvorteil.

Der aktuelle Status des HKN-Systems sowie die Kritik am System, die Notwendigkeit einer Überarbeitung und die Anforderungen an eine neue Lösung werden nachfolgend aufgezeigt. Wie das HKNR überarbeitet werden kann und welche Chancen sich daraus ergeben, ist in [17] detailliert dargestellt.

### 2.1 Status Quo

In Deutschland müssen Stromlieferanten nach § 42 des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) den Anteil der einzelnen Energieträger im Rahmen der Stromkennzeichnung gegenüber Letztverbrauchern angeben [1]. In Abbildung 2-1 ist eine vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Stromkennzeichnung mittels HKN dargestellt. Für eine ausführlichere Darstellung siehe Anhang 9.1. Diese Prozesse werden im Folgenden kurz erläutert. Für ausführlichere Erläuterungen siehe [17].

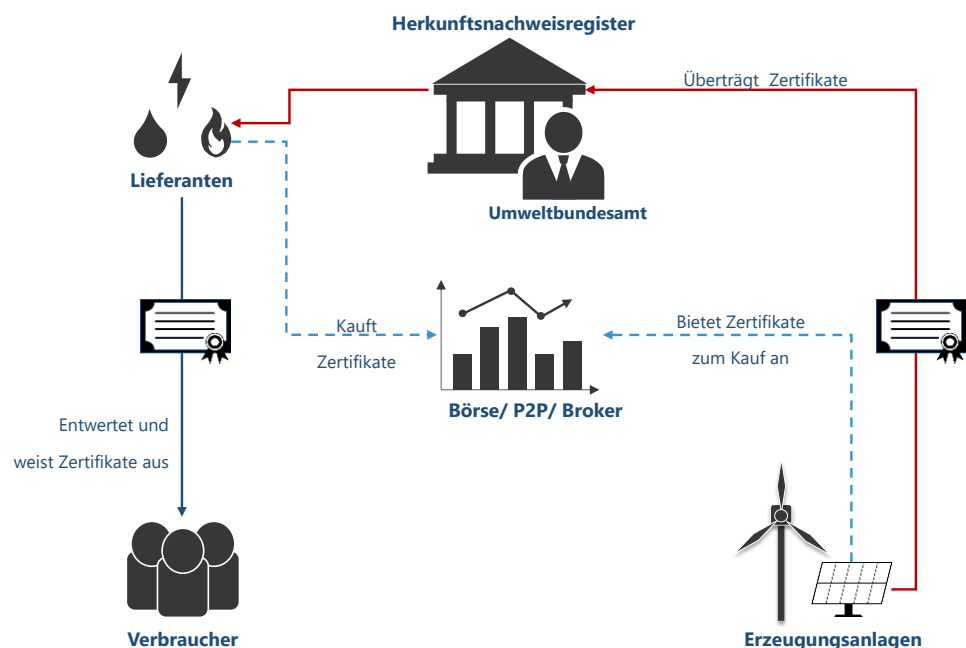


Abbildung 2-1: Stark vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Stromkennzeichnung mittels HKN.

Wurde in einer Erzeugungsanlage Strom aus erneuerbaren Energien (EE) produziert, kann durch das HKNR, welches vom Umweltbundesamt (UBA) geführt wird, ein HKN ausgestellt werden. Ein HKN entspricht einer Megawattstunde erzeugten Stroms. Ein Anlagenbetreiber kann sich einen HKN ausstellen lassen, sofern er nachweislich eine Megawattstunde Strom



erzeugt und geliefert hat und den Strom per sonstiger Direktvermarktung nach § 21a EEG verkauft. An EEG-geförderte Anlagen dürfen also heute keine HKN ausgestellt werden (§80 EEG „Doppelvermarktungsverbot“).

Stromlieferanten und Anlagenbetreiber haben Konten beim HKNR, die den Handel mit HKN ermöglichen. Dieser Handel ist unabhängig vom physikalischen Stromfluss. Es gibt für HKN einen eigenen Markt mit eigener Preisbildung, der unabhängig vom Handel mit Strommengen ist. HKN können innerhalb der EU, des europäischen Wirtschaftsraums, der Schweiz und der Energiegemeinschaft [2] gehandelt werden. Der Handel erfolgt meist als außerbörslicher „over the counter“ (OTC)-Handel, direkt oder über Broker [3]. Außerdem werden an der europäischen Strombörse EEX HKN aus dem französischen HKNR in Auktionen gehandelt [4], [5].

HKN werden durch die Stromlieferanten eingekauft und entwertet. Die Anzahl der entwerteten HKN entspricht der Strommenge einer Stromlieferung im Rahmen eines bestimmten Stromproduktes oder der Belieferung eines bestimmten Kunden. Mit der Entwertung wird der HKN für gelieferten Strom über einen Bilanzierungszeitraum von einem Kalenderjahr erbracht.

Das HKNR ermöglicht es Stromlieferanten, Letztverbrauchern „Ökostromtarife“ anzubieten. Zusätzlich zum Anteil des Stroms, der aus EEG-geförderten Erzeugungsanlagen stammt, können dazu durch den Lieferanten HKN für Strom aus erneuerbaren Energien hinzugekauft werden, sodass die Stromkennzeichnung ausschließlich erneuerbare Energien ausweist.

## 2.2 Notwendigkeit einer Überarbeitung

---

Das HKNR wurde im Jahr 2013 ins Leben gerufen. Zwar wurden seitdem kleinere Anpassungen vorgenommen, an der grundsätzlichen Struktur und am Funktionsumfang wurde jedoch nur wenig angepasst. Im Laufe der Zeit stiegen jedoch die Möglichkeiten durch Digitalisierung ebenso wie die Anforderungen an das System, welche nachfolgend dargestellt werden:

### **Kritik am System der Herkunftsnachweise**

Die HKN und das HKNR stehen in der Kritik. Wie in [17] aufbereitet, ist es für Kleinanlagen schwer am Register teilzunehmen. Schuld sind die damit einhergehenden Kosten, der bürokratische Aufwand sowie die Restriktion von HKN auf eine Megawattstunde. Fehlende Schnittstellen und manuelle Prozesse verhindern die Automatisierung. Der Kernkritikpunkt bezieht sich darauf, dass HKN so gut wie keinen Einfluss auf die Energiewende haben [6].

### **Verfügbarkeit von Smart Metern**

Wenngleich mit Startschwierigkeiten, ist Rechtssicherheit für den Smart Meter Rollout durch das Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW) im Frühjahr 2023 geschaffen worden. Damit ist der Rollout ab 2023 möglich und bis Ende 2025 sind 20 % der verpflichtenden Messstellen mit einem Smart Meter Gateway (SMGW) auszustatten. Bis Ende 2032 sollen 95 % aller verpflichtenden Messstellen (alle Verbraucher ab 6.000 kWh und alle Erzeuger ab 7 kWp) mit einem SMGW ausgestattet werden [7].

SMGW ermöglichen eine digitale und geeichte Messwerterfassung sowie -übertragung mit hoher zeitlicher Auflösung (z. B. 15 Minuten). Somit ist es möglich, auf dieser Infrastruktur aufzubauen und diese in vorhandene Prozesse zu integrieren.

## Nachhaltigkeitsberichterstattung und Lieferkettengesetz

Im Rahmen der „Corporate Sustainability Reporting Directive“ (CSRD) werden in den nächsten Jahren bis zu 15.000 deutsche Unternehmen dazu verpflichtet, über die soziale und ökologische Nachhaltigkeit ihres Wirtschaftens zu berichten [19]. Die Berichtspflichten beinhalten unter anderem direkte und indirekte Emissionen. Dabei spielt bei marktbasierter Emissionen die Beschaffung des Stroms sowie von HKN eine wichtige Rolle. Bereits heute setzen sich Unternehmen Ziele, die deutlich über die gesetzlichen Anforderungen hinaus gehen. Die Treibhausgas (THG)-Emissionen stündlich nachzuweisen stellt dabei eine große Herausforderung dar, da weder Methoden noch Register für eine solche Auflösung ausgelegt sind.

## Grüner Wasserstoff und grüne Wärme

Im Zuge der Sektorkopplung nimmt die Bedeutung von grün produziertem Wasserstoff und grüner Wärme zu. Dabei regelt der Delegated Act zu Artikel 27 RED II [8], welche Voraussetzungen mit Strom produzierter Wasserstoff erfüllen muss, um vollständig auf das Verkehrsziel in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie anrechenbar zu sein. Die Anforderungen sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

All die in diesem Kapitel dargestellten Argumente schlagen sich in veränderten Anforderungen nieder, die nachfolgend zusammengefasst werden.

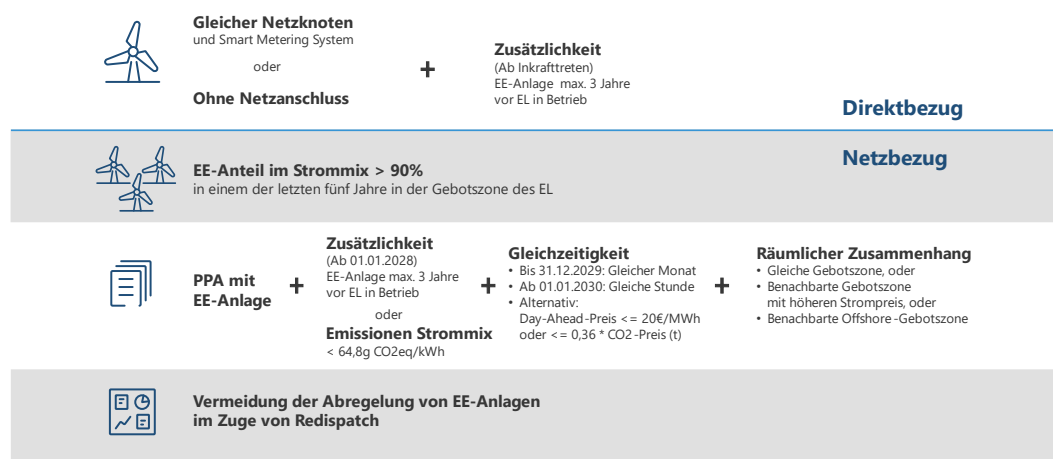


Abbildung 2-2: Übersicht über die Voraussetzungen nach dem Delegated Act [8] zur Kennzeichnung von Wasserstoff als „grün“. Jede Zeile enthält eine mögliche Kombination von Kriterien, die für grünen Wasserstoff jeweils erfüllt sein müssen.

## 2.3 Anforderungen an eine neue Lösung

---

Die nachfolgenden Anforderungen stellen wir auf Basis unserer Vorarbeit an unsere Lösung:

1. Nachweis von Stromherkunft (Ort) und -qualität mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung
2. Zeitliche und räumliche Kopplung von Erzeugung und Verbrauch
3. Integration von Kleinanlagen ab 1 kWp
4. Einfachheit und Verständlichkeit sowie Nutzerfreundlichkeit (für Erzeuger und Verbraucher)
5. Nachvollziehbare (ggf. auditierbare) Ausweisung der Treibhausgasemissionen auf Basis der Herkunftsnachweise (Kopplung erforderlich)
6. Lenkungswirkung für Nutzungsverhalten (z. B. für den Einsatz von Flexibilität)
7. Manipulationsresistenz oder -evidenz und Einhaltung zuvor definierter Regeln (z. B. Doppelvermarktungsverbot)
8. Möglichkeiten für Lieferanten, individuelle Tarife und Zusatzdienstleistungen anzubieten
9. Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Daten und Prozessen, vor allem gegenüber prüfenden Behörden wie dem UBA
10. Einhaltung von Datenschutz und Datensparsamkeit
11. Skalierbarkeit
12. Kompatibilität zur Smart Meter Infrastruktur zur Vermeidung von Intermediären und Ineffizienzen bei der Datenübertragung sowie zur Gewährleistung von Abrechenbarkeit und geeichter Messwerte
13. Kompatibilität zu einer zukünftigen Ausgestaltungsform des HKNR [17]

Auf Basis dieser Anforderungen wird nachfolgend unsere Lösung vorgestellt.

## 3 Lösungsvorschlag

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung unseres Lösungsvorschlags. Der Fokus liegt dabei vor allem auf dem unkomplizierten und digitalen HKN für Kleinanlagen – direkt über einen Lieferanten oder Energiedienstleister.

### 3.1 High-Level-Beschreibung

---

Aus technischer Sicht sind HKN mit vorhandener digitaler Messwerterfassung relativ einfach abzubilden. Erzeugungs- und Verbrauchsdaten werden über Smart Meter in hoher zeitlicher Auflösung erfasst und an denjenigen übertragen, der einen HKN gegenüber seinen Verbrauchern ausstellen möchte (z. B. ein Lieferant, im Folgenden „Anbieter“ genannt). Die Erzeugung und der Verbrauch des gleichen Zeitraums können anschließend durch diesen Anbieter nach beliebiger Logik einander zugeordnet werden („Matching“). Das Matching kann als Durchschnittswert für alle Verbraucher erfolgen oder direkt einzelne Erzeugungsanlagen einem oder mehreren Verbrauchern zuordnen. Es ist möglich, die räumliche Nähe, die gewünschte Zusammensetzung des Strommixes einzelner Verbraucher und vertragliche oder netztechnische Randbedingungen dabei zu berücksichtigen.

Das Ergebnis wird im Anschluss z. B. über eine App oder Weboberfläche dargestellt und der individuelle CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (z.B. Scope 2 oder 3) gegenüber dem Letztverbraucher ausgewiesen.

Die beschriebene Lösung ist technisch relativ gut umsetzbar, bietet viele Freiheiten bei der Produktgestaltung und ist für alle Beteiligten unkompliziert, da sie vollständig automatisierbar ist. Betreibt ein Lieferant diesen Service, darf er die Erzeugungs- und Verbrauchsdaten nach § 49 Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) auch von den Smart Metern abrufen und verarbeiten. Gleiches gilt für dessen Auftragsverarbeiter oder einen Energiedienstleister, der diesen Service mit Zustimmung der Verbraucher anbietet.

Die Kernherausforderung besteht jedoch aus systemischer Sicht darin, dass die Einhaltung von übergeordneten Regeln (z. B. keine Doppelvermarktung von EE-Mengen, Diskriminierungsfreiheit oder Einhaltung von § 80 EEG) für verantwortliche Behörden (z. B. das Umweltbundesamt) kaum überprüfbar sind. Aus diesem Grund ist ein HKN nur gültig, wenn er über das HKNR beantragt, ausgestellt, übertragen und entwertet wurde.

Für eine Überprüfung müssten die für den HKN verwendeten Smart Meter-Daten vollständig übertragen oder durch eine unabhängige Instanz einsehbar werden. Vor dem Hintergrund des Datenschutzes, der großen Datenmengen, notwendiger Schnittstellen und Prozesse steht dieser Aufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen der Lösung. Es müsste also möglich werden, die Richtigkeit der Daten und Prozesse einzelner Anbieter einer solchen Lösung zu überprüfen, ohne die Daten einsehen zu müssen.

#### **Wie kann gewährleistet werden, dass jeder Anbieter die Regeln einhält?**

Um dies aufzulösen, setzen wir im Projekt InDEED auf sogenannte „Zero-Knowledge Proofs“ (ZKP). Diese, zu Deutsch „Null-Wissens-Beweise“ genannt, sind kryptographische Verfahren mit deren Hilfe sich das Vorhandensein von Wissen (oder Daten) ebenso nachweisen lässt, wie die korrekte Ausführung von Prozessen. Dabei erstellt derjenige, der den Beweis erbringen muss (hier: der Anbieter der Labeling-Lösung, auch „proofer“ genannt) einen Beweis mittels

ZKP. Eine überprüfende Instanz („verifier“) kann anhand dieses Beweises die Richtigkeit bestätigen und sich sicher sein, dass die zuvor definierten Regeln eingehalten wurden.

Im Beispiel des Labelings (Nachweis von Grünstromeigenschaften) von Kleinanlagen umfassen diese Regeln unter anderem:

- Es wurden nur signierte Daten aus zertifizierten Smart Metern verwendet
- Es wurden keine Erzeugungsmengen doppelt gegenüber Verbrauchern nachgewiesen
- Es wurden nur Energiemengen einander zugeordnet, die im gleichen Zeitfenster (z. B. 15 Minuten) erzeugt und verbraucht wurden.
- Es wurden keine EE-Anlagen verwendet, die eine EEG-Förderung erhalten

Dabei umfasst der Begriff „Labeling“ hier die eindeutige, transparente und manipulationsevidente digitale Abbildung von Einspeisung, Entnahme und Speicherung sowie deren zeitliche und räumliche Verknüpfung unter Berücksichtigung physikalischer Randbedingungen [9]. Der Anbieter kann eine Labeling-Lösung für seine Kunden, im Rahmen der zuvor definierten Regeln, so gestalten, wie er dies möchte. Für jeden Zeitschritt, in dem er ein Matching durchführt, erstellt er einen Beweis, den er öffentlich zur Verfügung stellt. Jeder kann diesen Beweis prüfen und bestätigen, dass dieser korrekt ist. Wurden Daten manipuliert oder Regeln nicht eingehalten, ist der Beweis ungültig. Es kann jedoch nicht festgestellt werden, was daran falsch war, sondern nur dass er falsch war (Manipulationsevidenz). Letztverbraucher können dann darauf vertrauen, dass die Angaben ihres Anbieters richtig sind, wenn der ZKP dies bestätigt. Behörden können prüfen, dass alle Regeln eingehalten wurden. Niemand muss die dahinter liegenden Daten direkt prüfen, solange der Beweis korrekt ist.

Der Beweis selbst ist vollkommen losgelöst von personenbezogenen Daten. Er kann also ohne Weiteres öffentlich gemacht werden. Im Projekt InDEED setzen wir hier auf die Blockchain-Technologie. Der Anbieter lädt den Beweis auf eine öffentliche Blockchain. Ein Smart Contract überprüft diesen und hinterlegt für alle einsehbar, dass der Beweis korrekt war. Es ist daher nicht nötig, dass jeder (z. B. die Kunden oder Behörden) den Beweis einzeln empfängt und überprüft.

### **Warum wird nicht allein auf die Blockchain-Technologie gesetzt?**

Zwar könnte eine Überprüfung der Regeln auch über Blockchain-Lösungen und Smart Contracts erfolgen. Energiedaten müssten dafür jedoch dort gespeichert werden. Dies trägt weder dem Datenschutz noch der Datensparsamkeit Rechnung. Es ist zudem sehr schwer bis unmöglich, Daten zu anonymisieren, wenn insbesondere der Ort von Erzeugung und Verbrauch eine Rolle beim HKN spielen. Auch sind sowohl die Blockchain-Technologie als auch die darauf basierenden Smart Contracts nicht für komplexe Rechenaufgaben oder große Datenmengen geeignet. Mehr Informationen zu den Hintergründen sind [hier](#) und [hier](#) zu finden.

### **Was ist noch nötig, um Zero-Knowledge Proofs zu realisieren?**

Zero-Knowledge Proofs sind in der Lage, die Einhaltung von zuvor definierten Regeln zu prüfen und gegenüber Dritten nachzuweisen, ohne die dafür notwendigen Daten offenzulegen.

Dafür ist es jedoch notwendig, dass die Regeln eindeutig formuliert und mathematisch prüfbar sind. Dies wird anhand von mehreren Beispielen nachfolgend gezeigt:

- Eine Regel ist beispielsweise, dass nur Daten verwendet werden, die von Smart Metern stammen. Dies ist innerhalb der Smart Meter Public Key Infrastructure (PKI) gut zu überprüfen, da die übertragenen Daten digital signiert sind. Der ZKP kann die Signaturen einsehen und abgleichen, ob diese gültig sind.
- Erzeugungs- und Verbrauchsdaten aus Smart Metern sind mit einem Zeitstempel versehen. Ein Matching gilt nur dann als richtig, wenn die Zeitstempel der Messwerte zueinander passen. Der ZKP vergleicht daher die Zeitstempel.
- Ein anderes Beispiel ist, dass digital signierte Erzeugungsdaten aus den Smart Metern den Daten entsprechen müssen, die den Verbrauchern gegenüber ausgewiesen werden. Zu diesem Zweck muss die Summe der signierten Erzeugungsdaten in einem Zeitschritt größer oder gleich den Erzeugungsmengen sein, die den Verbrauchern gegenüber ausgewiesen wurden. Dadurch kann eine Doppelvermarktung beim Matching ausgeschlossen werden. Der ZKP vergleicht daher die Summen dieser Mengen.
- Mit den bisher beschriebenen Regeln wird nur die Doppelvermarktung im Nachweis eines einzelnen Anbieters unmöglich. Um sicherzustellen, dass eine EE-Anlage nicht bei mehreren Anbietern gleichzeitig verwendet wird, muss auch überprüft werden, dass nur Anlagen von einem Anbieter verwendet werden, die diesem auch offiziell zustehen. Dafür ist ein einheitliches Register notwendig, in dem dies eindeutig, für alle zugänglich und damit überprüfbar dokumentiert ist. Der ZKP überprüft dann dieses Register und ob die von einem Lieferanten verwendeten Anlagen rechtmäßig von diesem verwendet werden dürfen.
- Das Gleiche gilt für die Doppelvermarktung von EEG-Anlagen nach § 80 EEG. Um zu vermeiden, dass Anlagen mit Förderung genutzt wurden, muss analog zum vorigen Beispiel ein Register geführt werden, in dem eine etwaige Förderung klar einzelnen Anlagen zugeordnet wird. Der ZKP überprüft dann dieses Register.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es ein oder mehrere Register braucht, in denen diese Informationen manipulationsresistent, überprüfbar, eindeutig und transparent für alle Akteure zugänglich sind. Dafür bietet sich ein Blockchain-Register an. Dort wird, für jeden zugänglich, die notwendigen Informationen über beteiligten Anlagen bereitgestellt. Dies ist in Abbildung 7-1 in Abschnitt 7 dargestellt. Unterschiedliche Marktakteure sind dabei für die Korrektheit und die Pflege der Daten verantwortlich. Zudem sind für dieses System Maschinen-Identitäten und „verifiable credentials“ notwendig (mehr dazu siehe Abschnitt 7). So könnten beispielsweise EEG-Vergütungen von den Netzbetreibern geprüft und/oder bereitgestellt werden.

### 3.2 Prozesse und Abläufe und Einordnung ins aktuelle Herkunftsnachweissystem

---

Die im Forschungsprojekt InDEED entwickelte Lösung zur Kennzeichnung von Strommengen kann grundsätzlich auch als abgeschlossenes System arbeiten. Zudem ist es möglich, die InDEED-Lösung in ein neues HKN-System (vgl. [17]) einzubetten. Dazu ist es nötig, die relevanten Schnittstellen für beide Systeme zu definieren. Im Folgenden werden die Abläufe innerhalb der InDEED-Lösung und die Schnittstellen zum HKN-System definiert.

#### **Welche Erzeuger können an der InDEED-Lösung teilnehmen?**

Die InDEED-Lösung wurde als Opt-In-Variante für Kleinanlagen entworfen. Die Idee dahinter ist es, Kleinanlagen unterhalb der Wirtschaftlichkeitsgrenze nicht über das HKNR, sondern

über die InDEED-Lösung abzuwickeln. Als Kleinanlagen werden in diesem Fall Anlagen mit einer Leistung von weniger als 30 kWp bezeichnet. Der Anmeldeprozess für die InDEED-Lösung wird in Abbildung 3-1 beschrieben. Zunächst wird geprüft, ob es sich bei der Anlage tatsächlich um eine Kleinanlage handelt. Ist das nicht der Fall, so besteht lediglich die Möglichkeit, die Anlage beim HKN-System zu registrieren und den regulären Weg über HKN zu gehen. Zur Teilnahme an der InDEED-Lösung registriert der Betreiber die Anlage bei einem geeigneten Lieferanten. Dieser prüft anschließend, ob die Anlage bereits bei einem anderen HKN-System registriert ist, um Doppelvermarktung auszuschließen. Dafür ist es erforderlich, dass diese Information in einem öffentlich zugänglichen Register mit einer entsprechenden Schnittstelle geführt wird. Dort muss hinterlegt werden, für welches System sich eine EE-Anlage entscheidet und welchem Lieferanten sie eindeutig zugeordnet ist.

Ist die Anlage bereits beim HKN-System gemeldet, so meldet der Lieferant die Anlage ab und hinterlegt im Register, dass diese nun ihm zugeordnet ist. Dieser Vorgang vermeidet eine mögliche Doppelvermarktung. Zusätzlich muss der Anlagenbetreiber einwilligen, dass der Lieferant auf die Smart Meter Daten zugreifen und diese für das Labeling verwenden darf.

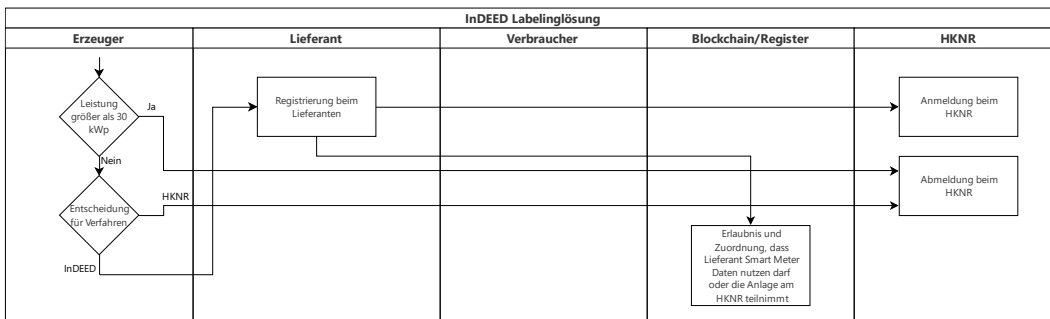


Abbildung 3-1: Anmeldeprozess

Über das notwendige Smart Meter an der Anlage wird nun das entsprechende Kommunikationsprofil hinterlegt und die Daten z. B. viertelstündlich an den Lieferanten gesendet. Dies wird durch den Tarifanwendungsfall 7 (TAF7) ermöglicht. Dieser erlaubt die Erfassung und Versendung von Zählerstandsgängen [10].

### Wie wird der Strom gelabelt?

Wurde der Anmeldeprozess erfolgreich durchlaufen, so kann die Anlage an der InDEED-Lösung teilnehmen. Der Ablauf des Labelings innerhalb der InDEED-Lösung ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Zur Durchführung der Stromkennzeichnung werden die dafür notwendigen Erzeugungs- und Verbrauchsdaten durch Smart Meter erfasst und an den zugeordneten Lieferanten übertragen. Im selben Zeitschritt werden auch die durch den Lieferanten zu deckenden Stromverbräuche mittels Smart Meter erfasst. Sind ausreichend Strommengen vorhanden, so wird eine automatische Zuordnung („Matching“) zwischen Erzeugung und Verbrauch durchgeführt. Dabei wird jedem Verbraucher ein gewisser Anteil der erzeugten Strommengen zugewiesen. Diese Zuordnung kann dabei auch zwischen einzelnen Erzeugern und Verbrauchern erfolgen sowie räumliche Nähe oder Priorisierungen von Verbrauchern, vertragliche Strukturen und/oder Stromprodukte abbilden (Details siehe Abschnitt 4).

Um zu beweisen, dass die Zuordnung korrekt abgelaufen ist und alle sonstigen Regeln eingehalten wurden, wird ein ZKP verwendet. Dieser ist in der Lage kryptographisch nachzuweisen, dass bei der Zuordnung alle zuvor definierten Regeln eingehalten wurden.

Diese Regeln beinhalten u. a., dass Energiemengen nicht doppelt zugeordnet werden dürfen, dass nur Anlagen verwendet wurden, die der jeweilige Lieferant zuordnen darf (vgl. Register) und dass vorhandene vertragliche Strukturen berücksichtigt wurden. Dafür müssen keine Erzeugungs- und Verbrauchsdaten offengelegt werden. Stattdessen wird lediglich ein kryptographischer Beweis erbracht, den jeder zu Prüfungszwecken einfach überprüfen kann. Das Validierungsverfahren durch ZKPs ermöglicht daher einen DSGVO-konformen Nachweis zur öffentlich einsehbaren Kontrolle der Stromkennzeichnung, obwohl diese durch die Lieferanten durchgeführt wird.

Der ZKP wird anschließend auf einer Blockchain gespeichert und durch einen Smart Contract geprüft. Dies verhindert, dass alle Verbraucher und involvierten Behörden (hier das UBA als Betreiber des HKNR) den Beweis individuell prüfen müssen. Abschließend erhält sowohl jeder Verbraucher als auch eine übergeordnete Prüfinstanz (z. B. das UBA) eine Mitteilung über die korrekt durchgeführte Stromkennzeichnung.

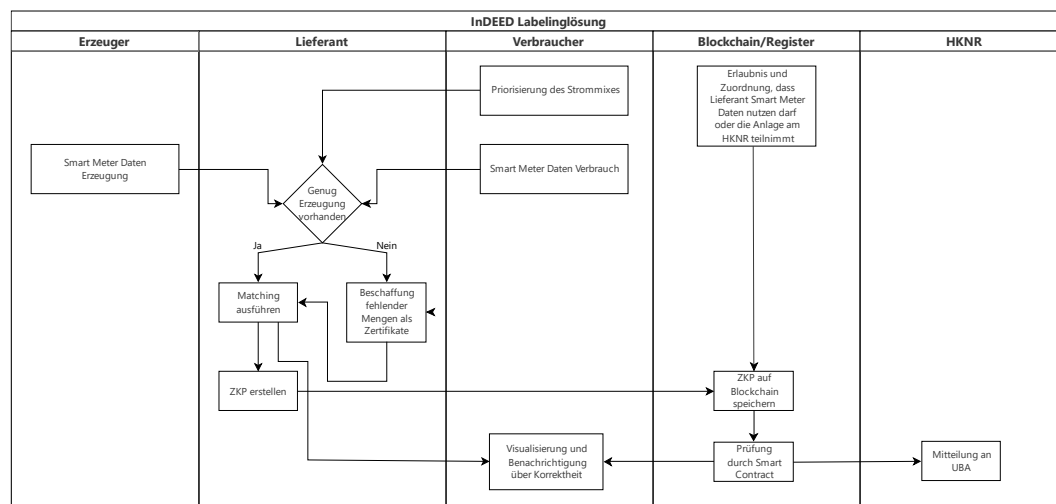


Abbildung 3-2: Stromlabeling mit Zero-Knowledge Proof (ZKP)

Verbraucher erhalten diese Information direkt in ihrem Frontend z. B. in Form eines Hakens oder können den Beweis selbst auf der Blockchain prüfen. Damit können Sie sich sicher sein, dass die in Echtzeit dargestellte Stromherkunft auch korrekt berechnet wurde.

### Was passiert, wenn nicht ausreichend Strom bereitgestellt wird?

Reichen die Strommengen, die dem Lieferanten aus den SMGW-Daten der ihm zugeordneten Anlagen zur Verfügung stehen, nicht aus, um den Verbrauch an einem gewissen Zeitpunkt zu decken, so besteht die Möglichkeit, dieses Defizit über das HKNR zu decken. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Grundvoraussetzung für einen Austausch von Zertifikaten zwischen den beiden Ebenen ist, dass die zeitliche Auflösung der Zertifikate (z. B. 15 min) gleich groß ist und der Handel synchron abläuft. Dazu muss das HKNR gemäß den Vorschlägen aus [17] angepasst werden. Zur Deckung des Defizits beschafft der Lieferant HKN aus dem freien Handel und entwertet diese anschließend, um sie beanspruchen zu können. Dabei wird durch einen ZKP geprüft, ob bei der Beschaffung der HKN die entsprechenden Regeln eingehalten wurden. Diese Information wird anschließend auf dem öffentlichen Register gespeichert, so dass die Verbraucher wissen, dass zu diesem Zeitpunkt externe Zertifikate korrekt beschafft wurden.

Nach dem Entwerten und Prüfen der HKN werden die dadurch repräsentierten Strommengen in die InDEED-Lösung integriert. Das Matching verläuft analog zum vorherigen Abschnitt. Der



Unterschied zu den Kleinanlagen, die direkt mittels SMGW eingebunden sind, ist der, dass bei HKN weniger Informationen vorliegen (z. B. über den Ort) und sich die Anlagen hinter den HKN ohnehin vermutlich nicht vor Ort befinden.

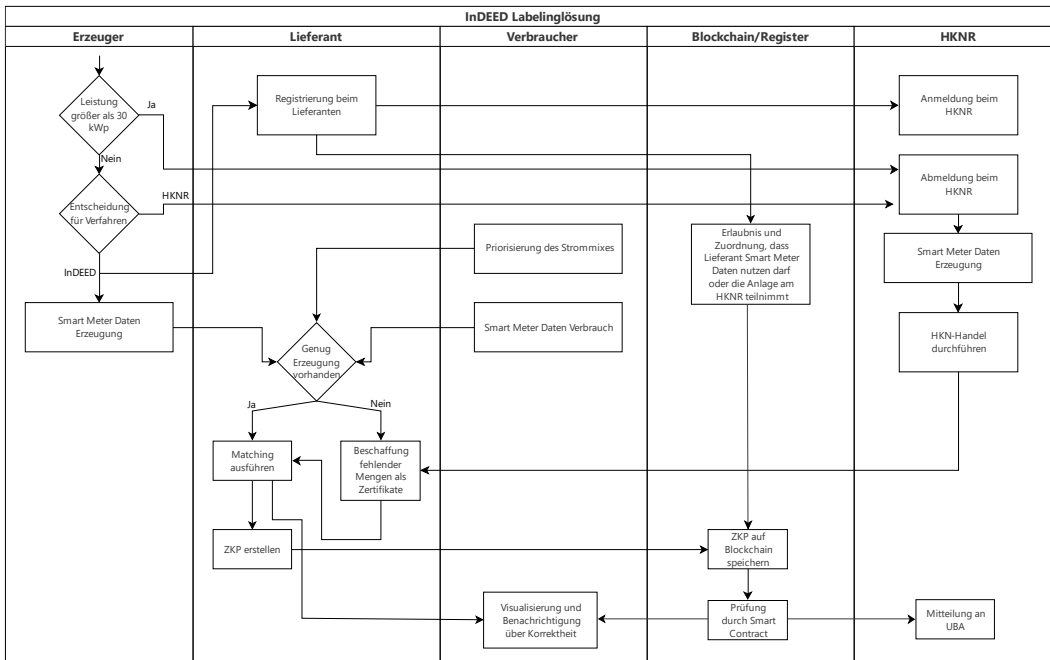


Abbildung 3-3: Beschaffung von Zertifikaten aus dem HKNR

### Was passiert, wenn zu viel Strom bereitgestellt wird?

Wird durch die beim Lieferanten registrierten Kleinanlagen mehr Strom erzeugt, als im selben Zeitabschnitt verbraucht wird, so kommt es zu einer Überdeckung. Die InDEED-Lösung bietet eine Möglichkeit, diese Überschüsse an Grünstrom an die übergelagerte HKNR-Ebene zu übertragen. Dies ist möglich, solange die zeitliche und räumliche Auflösung innerhalb der InDEED-Lösung mindestens der des HKNR entspricht. Das Vorgehen ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

Strommengen, die innerhalb des Matchingprozesses keinem Verbraucher zugeordnet werden können, können durch den Lieferanten aggregiert werden. Diese Aggregation erfolgt gemäß Regeln, die vorab vom HKNR definiert wurden. Grundlage dieser Regeln können die geographische Lage und Art der Erzeugungsanlagen bilden (z. B. Aggregation nach Anlagentyp und innerhalb einer Postleitzahlregion). Das Einhalten dieser Regeln kann durch den ZKP überprüft und in der Blockchain gespeichert werden. Die aggregierten Strommengen werden ebenfalls direkt über den ZKP nachgewiesen, auf der Blockchain gespeichert und dem HKNR direkt gemeldet. Dieses kann durch Einsehen der Blockchain überprüfen, ob die korrekten Strommengen gemeldet wurden. Anschließend stellt das HKNR dem Lieferanten HKN über die gemeldeten Strommengen aus. Diese können dann am Markt gehandelt, übertragen und durch einen anderen Lieferanten entwertet werden.

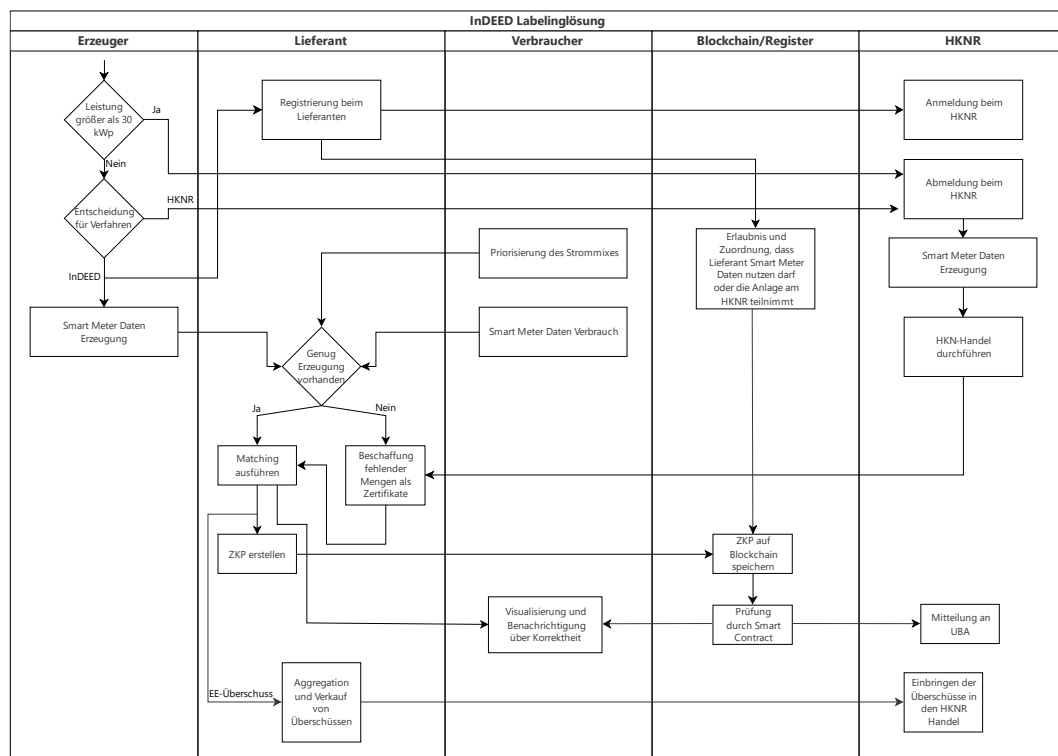


Abbildung 3-4: Übertragung von Zertifikaten an das HKNR

### Wie kommen Erzeugungsanlagen zu einem Lieferanten?

Grundsätzlich ist dies relativ flexibel. Es sind mehrere Varianten denkbar, von denen zwei nachfolgend dargestellt werden.

1. Ein Lieferant darf nur diejenigen Anlagen mit Hilfe der dargestellten Lösung gegenüber Letztverbrauchern nachweisen, mit denen er einen Direktvermarktungsvertrag abgeschlossen hat. Dies gewährleistet, dass die ausgewiesenen Strommengen mit der Stromlieferung gekoppelt sind.
2. Analog zum bisher bestehenden HKN-Modell können sich EE-Anlagen den Anbieter frei auswählen (z. B. über einen Markt, Broker etc.) dem sie für eine gewisse Zeit das Recht einräumen, sie in dessen Labeling-Lösung zu führen. Dafür wäre kein Direktvermarktungsvertrag notwendig. Dafür sind die ausgewiesenen Strommengen entsprechend nicht mit der Stromlieferung gekoppelt.

Wichtig ist, dass in beiden Optionen die Zuordnung einer Erzeugungsanlage zu einem Lieferanten klar und für alle transparent in einem Register vermerkt wird, sodass Doppelvermarktung ausgeschlossen werden kann.

# 4 Anwendungsfälle der Labeling-Lösung

Im Nachfolgenden werden verschiedene Anwendungsfälle für die vorgestellte Lösung skizziert.

## 4.1 Individuelle Stromherkunft

---

Ein besonderer Vorteil der InDEED-Lösung ist es, dass, je nachdem wie das Matching ausgestaltet ist, entweder alle Verbraucher innerhalb eines Stromproduktes den gleichen Strommix erhalten (wie dies heute üblich ist) oder jeder einzelne Verbraucher einen individuellen Strommix ausgewiesen bekommt. Dies lässt insbesondere Lieferanten und Verbrauchern die Freiheit, Stromprodukte oder vertragliche Randbedingungen (z. B. Power Purchase Agreements (PPAs)) individuell und innovativ zu gestalten. Dabei sind beispielsweise folgende Ausgestaltungen möglich.

### **Stromherkunft auf Basis:**

- ... der räumlichen Nähe: Erzeugung wird in jedem Zeitschritt den jeweils nächsten Verbrauchern zugeordnet
- ... der Priorisierung: Verbraucher haben die Möglichkeit, ihre Stromherkunft zu priorisieren. Diese Priorisierung wird dann bei der Zuordnung berücksichtigt.
- ... der Eigentümerstruktur: Die gemeinsame Finanzierung von Erzeugungsanlagen mittels Crowdfunding und/oder in Form von Bürgerenergiegenossenschaften nimmt an Popularität zu. Die Anteile, basierend auf der Finanzierung durch verschiedene Verbraucher und können beim Matching berücksichtigt werden.
- ... vertraglicher Randbedingungen: so wird beispielsweise Strom priorisiert auf Basis vertraglicher Randbedingungen (z. B. PPA, Mieterstrom) verteilt
- ... von Netzrestriktionen: Im Matching ist es möglich, Netzrestriktionen mit zu berücksichtigen. So können beispielsweise Grenzkuppelkapazitäten oder Engpässe durch fehlende Stromtrassen einbezogen werden.
- ... der Kosten: Die RED II und die IEMD fordern die Reduktion unverhältnismäßiger Kosten für Energiegemeinschaften. Dies kann in der Zuordnung berücksichtigt werden, um die Kosten und Erlöse in der Gemeinschaft zu berücksichtigen.

Wie dieses Matching im Feld umgesetzt wurde und diese verschiedenen Aspekte noch einbezogen werden können, wurde in [11] und in [20] dargestellt.

## 4.2 Energy Communities und lokale Strommärkte

---

In der RED II und der IEMD wurde seitens der EU gefordert, Energiegemeinschaften und lokale Strommärkte durch das Absenken von regulatorischen Hemmnissen und ungerechtfertigten Kosten in den Mitgliedsländern zu ermöglichen [20].

Die Umsetzung in verschiedenen EU-Ländern ist dabei grundverschieden. So müssen in manchen Ländern nur die Netzebenen bezahlt werden, die auch für den Stromtransport notwendig waren. In anderen Ländern müssen Erzeuger und Verbraucher innerhalb eines gewissen Radius stehen, um weniger Steuern, Umlagen oder Netzentgelte bezahlen zu müssen [20]. Eine Umsetzung in Deutschland ist noch ausstehend.

Unabhängig von der Umsetzung in Deutschland haben alle EU-Lösungen gemein, dass der Strom, der innerhalb der Energiegemeinschaft produziert und gleichzeitig verbraucht wird, klar nachgewiesen werden muss, um die Vorteile bei Steuern, Umlagen und Netzentgelten in Anspruch nehmen zu dürfen.

Einerseits kann die InDEED-Lösung diese Randbedingungen im Matching berücksichtigen, andererseits das Ergebnis in Echtzeit an die entsprechenden Behörden oder Netzbetreiber bzw. an die Mitglieder der Gemeinschaft melden. Dabei ist es nicht nötig, die Verbrauchs- und Erzeugungsdaten einzelner Verbraucher oder Anlagen offen zu legen.

#### 4.3 Treibhausgas-Vorhersage und -Nachweis

---

Ein elementarer Bestandteil der Nachhaltigkeitsberichterstattung sind methodisch korrekt berechnete Treibhausgas-Nachweise. Dafür müssen ortsbezogene und können marktbezogene Treibhausgas-Nachweise (THG) verwendet werden. Während erstere losgelöst vom Handel mit HKN und der Wahl des Stromversorgers sind und einzig vom Ort des Stromverbrauchs abhängen, sind letztere („marktbezogene Emissionen“) direkt von der Wahl des Stromversorgers und der Entwertung von HKN abhängig.

Eine Kernherausforderung heute ist jedoch, dass die geringe zeitliche und räumliche Auflösung zu einem Überangebot von HKN führt. Zudem bilden HKN dadurch die tatsächliche Verfügbarkeit von Grünstrom nicht ab. Die hier dargestellte Lösung kann, in Kombination mit einem überarbeiteten HKN-System (siehe [17]), diese Herausforderung lösen. Somit wäre es möglich, THG-Emissionen jedes einzelnen Verbrauchers transparent und hochaufgelöst auszuweisen. Der Nachweis würde auf der verfügbaren Erzeugung aus Kleinanlagen, zugekauften HKN vom HKNR in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung sowie auf einem manipulationsresistenten Matching von Erzeugung und Verbrauch basieren. Dafür ist es nicht erforderlich, dass der Stromverbrauch offengelegt werden muss.

Da jedem Energieverbraucher ein individueller Strommix mit dieser Lösung zugewiesen werden kann, ist es lediglich erforderlich, die THG-Emissionen des Graustrommixes einheitlich für alle gleich und damit vergleichbar auszuweisen. Dies muss jedoch in der gleichen zeitlichen Auflösung erfolgen wie die HKN (z. B. in 15 Minuten).

Im Rahmen des Projektes InDEED wurde dafür einerseits ein Tool entwickelt, um ex-post auf Basis von ENTSO-E-Daten Treibhausgase auszuweisen und andererseits eine THG-Prognose unter [opendata.ffde.de](https://opendata.ffde.de) bereitzustellen. Diese dient dazu, vorhandene Flexibilität perspektivisch so zu optimieren, dass THG-Emissionen minimiert werden.

Langfristig ist es hier notwendig, einheitliche Datengrundlagen, Standards und Methoden zu etablieren, um die THG-Emissionen vergleichen zu können. Die InDEED-Labeling-Lösung sowie die einheitliche Berechnung hochaufgelöster THG-Emissionen sind die Grundlage für die Zusammensetzung des Energieverbrauchs sowie individueller Emissionswerte.

#### 4.4 Speicher-Labeling

---

Innerhalb der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Energy Communities spielen neben Erzeugungsanlagen und lokalen Stromnetzen auch Speicher eine relevante Rolle. Diese Speicher können von einzelnen Stakeholdern finanziert und betrieben werden. In diesem Fall bietet das Labeling von ein- und ausgespeicherten Strommengen zusätzliche Erlöspotenziale, indem in Stunden mit geringen Emissionen und niedrigen HKN-Preisen Strom eingespeichert

und in Stunden mit hohen Emissionen und HKN-Preisen ausgespeichert wird. Dabei korrelieren diese Preise i. d. R. mit den Strompreisen.

Zusätzlich bietet das Labeling von Strommengen aber auch die Möglichkeit, Speicher als Bürgerenergiegenossenschaft oder Energiegemeinschaft zu finanzieren und zu betreiben. Dabei steht zum Beispiel jedem Miteigentümer eine Speicherkapazität gemäß seines investierten Kapitals zur Verfügung. Diese kann der Eigentümer analog zu einem privaten Heimspeicher verwenden. Die Kosten sind im Vergleich zu einem individuellen Heimspeicher aufgrund der Skaleneffekte jedoch deutlich geringer. Die individuelle Nutzung des Speichers durch mehrere Eigentümer wird dabei durch das Labeling von ein- und ausgespeicherten Strommengen ermöglicht. Die einzelnen Miteigentümer können sich so über ihre individuellen Speicherstände über eine Webanwendung oder eine App informieren. Die Herausforderung dabei sind heute vor allem Steuern und Umlagen, die dieses Modell unwirtschaftlich machen. Die Labeling-Lösung kann hochaufgelöst nachweisen, dass der Strom lokal direkt verbraucht wurde und damit ggf. die Abschaffung der dafür anfallenden Steuern und Umlagen rechtfertigen.

In beiden Anwendungsfällen ist es nötig, ein- und ausgespeicherte Strommengen in den Labelingprozess zu integrieren. Das hier vorgestellte Verfahren orientiert sich dabei an den Veröffentlichungen [12] und [13] von EnergyTag.

In der Labeling-Lösung bilden Speicher eine neue Klasse, die je nach Situation wie Erzeuger oder Verbraucher behandelt werden. Informationen zu eingespeicherten Strommengen (Zeit, Ort und Erzeugungsanlagenart) werden lokal abgespeichert. Beim Ausspeichern werden diese Informationen genutzt, um einen ZKP durchzuführen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die ursprünglichen Daten nicht manipuliert wurden.

#### 4.5 Aggregation von Kleinanlagen für die Teilnahme am Herkunftsnachweisregister

---

Ein Anwendungsfall der InDEED-Lösung ist die Aggregation von Kleinanlagen für die Teilnahme am HKNR. Heute ist dies nur wirtschaftlich sinnvoll, wenn Anlagen viele Megawattstunden im Jahr produzieren, da ein HKN einer Megawattstunde entspricht. Zudem sind die Kosten und der bürokratische Aufwand relativ hoch im Vergleich zum möglichen Erlös für HKN (Details siehe [17]).

Im Rahmen des ZKP können auch aggregierte Daten mit veröffentlicht werden. Darunter beispielsweise die Summe von Erzeugungswerten je Kraftwerkstyp. Dies betrifft auch die Überschüsse oder die Unterdeckung, wenn die (lokale) EE-Erzeugung immer zuerst im Rahmen lokaler Energiemärkte, Energiegemeinschaften oder Stromprodukte teilweise genutzt wurde. Der Vorteil dabei ist, dass die EE-Anlagen nicht einzeln beim HKNR angemeldet werden müssen. Ein Aggregator oder Energiedienstleister kann dies einmal übernehmen und die EE-Überschüsse über ZKP als HKN auf dem HKNR ausstellen lassen. Dies vereinfacht die Teilnahme für Kleinanlagen maßgeblich. Details zu dieser Lösung sind einerseits Abschnitt 3 und andererseits [17] zu entnehmen.

# 5 Proof of Concept und Praxistauglichkeit

Die dargestellte Labeling-Lösung wurde nicht nur konzeptionell entworfen und ausgestaltet, sie wurde in Teilen auch im Feld realisiert und praktisch erprobt. Der Feldversuch wird nachfolgend kurz dargestellt.

## 5.1 Proof of Concept

---

Im Proof of Concept (PoC) wurden einzelne Komponenten der Lösung implementiert und praktisch erprobt. Dabei wurde der Fokus insbesondere auf diejenigen Komponenten gelegt, die notwendig waren, um die praktische Umsetzbarkeit zu bewerten. Insbesondere Zero-Knowledge Proofs waren dabei der Fokus der Anwendung.

Die Daten von Verbrauchern und Erzeugern, die am PoC teilnahmen, wurden über verschiedene Schnittstellen an die Server der Universität Bayreuth übertragen. Diese „emulierte“ im Feldversuch die Tätigkeiten eines Grünstromanbieters, der mittels der InDEED-Labeling-Lösung zeitlich hochaufgelöste HKN an seine Letztverbraucher ausweist. Die Erzeugungs- und Verbrauchsdaten wurden im Fünfminutentakt erfasst und übertragen. Zu den Erzeugern und Verbrauchern war bekannt, wo diese geographisch verortet sind. Bei Erzeugern war zudem noch die Erzeugungsart bekannt.

Alle fünf Minuten wurden die Bewegungsdaten (Stromverbrauch und Erzeugung) aller Teilnehmer erfasst und ein Matching wie in [11] beschrieben durchgeführt. Im Matching wurde einerseits die räumliche Nähe zwischen Erzeugern und Verbrauchern mit dem Ziel berücksichtigt, Strom möglichst lokal zu verbrauchen. Überdies konnten Einzelproband:innen ihren Strommix priorisieren. Das Ergebnis wurde über eine eigens entwickelte Website visualisiert. Die Website beinhaltete eine Visualisierung des individuellen Stromverbrauchs, die Stromherkunft nach Erzeugungstyp, eine Kartendarstellung mit der Stromherkunft nach Erzeugungstyp und Ursprungsort sowie einer Visualisierung der damit einhergehenden THG-Emissionen. Zudem wurden die THG-Emissionen des Folgetags prognostiziert und ebenfalls visualisiert. Diese Daten basieren auf [opendata.ffe.de](https://opendata.ffe.de) (siehe Abschnitt 4.3).

Für jeden Zeitschritt wurde mittels ZKP überprüft, ob eine Doppelvermarktung stattgefunden hat. Zu diesem Zweck wurde geprüft, ob die Summe der Erzeugung (je Erzeugungstyp) und die Summe der gegenüber den Letztverbrauchern nachgewiesenen Mengen übereinstimmen. Überdies wurde geprüft, ob die verwendeten Daten digital signiert waren, sodass keine Daten verwendet wurden, die nicht aus der virtuellen, für den Feldversuch geschaffenen PKI, verwendet wurden. Der je Zeitschritt erstellte ZKP wurde im Anschluss auf einer Blockchain gespeichert und mittels eines Smart Contracts verifiziert. Das Frontend für Verbraucher griff auf diese Smart Contracts zu und prüfte, ob die visualisierten Daten zum ZKP passen und damit valide sind. Der technisch im Detail beschriebene Aufbau des PoC ist [14] zu entnehmen.

## 5.2 Umfang des Feldtests

---

Für den Feldtest wurden die Daten von verschiedenen Erzeugungsanlagen, Prosumern und (Groß-)Verbrauchern erfasst. Die Erzeugungsseite wurde hauptsächlich von fünf Wasserkraftanlagen mit Leistungen zwischen 70 kW und 500 kW abgebildet. Als Verbraucher wurden der Stromverbrauch der FfE am Standort München sowie der von zwei weiteren

anonymen, gewerblichen Großverbrauchern integriert. Zusätzlich konnten Daten von etwa 200 anonymen, mit PV-Anlage ausgestatteten Prosumerhaushalten aus ganz Deutschland mit einbezogen werden. Diese umfassten insgesamt zehn Postleitzahlregionen. Hierfür wurden die Daten der Prosumer auf Postleitzahlebene aggregiert (summiert) und an die Plattform für den Feldtest mittels API übertragen. Als Messwerte (aus Gründen der Anonymisierung) wurden die gesamte Netzeinspeisung und der gesamte Netzbezug je Postleitzahlregion herangezogen. Darüber konnten 16 Einzelproband:innen zur Teilnahme am Feldtest gewonnen werden, die ebenfalls diese Daten zur Verfügung stellten. Des Weiteren wurden die Daten zu Netzeinspeisung und -bezug von sechs großen Mehrfamilienhäusern mit einbezogen, die alle mit PV-Anlage, Wärmepumpe und Batteriespeicher ausgestattet sind für den Feldtest akquiriert wurden.

### 5.3 Ergebnisse des Feldtest

---

Mit Hilfe des PoC und des Feldtests konnte gezeigt werden, dass die InDEED-Lösung mit ZKP in der Lage ist, die Richtigkeit von Daten und Prozessen gegenüber Dritten nachzuweisen. Der Nachweis selbst über ZKP unterliegt dabei nicht dem Datenschutz, sodass dieser in beliebiger Form auch öffentlich zur Verfügung gestellt werden kann. Auch wenn nicht der volle Funktionsumfang getestet wurde, ist damit der Beweis erbracht, dass es technisch möglich ist, das in Abschnitt 3 dargestellte Konzept umzusetzen.

## 6 Wertversprechen der entwickelten Lösung

Nachfolgend erfolgt ein Abgleich der in Abschnitt 2.3 gestellten Anforderungen mit der von uns entwickelten und dargestellten Lösung.

Pa	Erfüllung	Beschreibung
Nachweis von Stromherkunft (Ort) und Qualität mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung	Voll	Durch 5-minütiges Matching von Erzeugung und Verbrauch wird diese Anforderung erfüllt. Dabei wird jedem Verbraucher auf Basis zuvor definierter Grundsätze (z. B. räumliche Nähe oder Priorisierung) ein oder mehrere Erzeuger zugeordnet und sowohl die Erzeugungsart als auch der Ort ausgewiesen.
Zeitliche und räumliche Kopplung von Erzeugung und Verbrauch	Voll	
Integration von Kleinanlagen ab 1 kWp	Voll	Die Erzeugungsleistung ist irrelevant. Einzig ein Smart Meter ist zur Teilnahme erforderlich. Dies ist bei Kleinanlagen ggf. unwirtschaftlich.
Einfachheit und Verständlichkeit sowie Nutzerfreundlichkeit (für Erzeuger und Verbraucher)	Voll	Aus Sicht von Erzeugern und Verbrauchern ist das System sehr einfach. Die Komplexität liegt auf Seiten des Proofs (z. B. des Lieferanten) in Form des Nachweises. Dies wird perspektivisch durch entsprechende Software vereinfacht.
Nachvollziehbare (ggf. auditierbare) Ausweisung der Treibhausgasemissionen	Voll	Im Rahmen von INDEED wurden noch keine auditierbaren CO <sub>2</sub> -Daten verwendet. Da die Stromherkunft jedoch mit der Lösung (durch ZKP) verifizierbar ist, trifft dies auch auf die THG-Emissionen zu.
Lenkungswirkung für Nutzungsverhalten (z. B. für den Einsatz von Flexibilität)	Nicht überprüft	Wenngleich durch die Verfügbarkeit von EE-Strom und die Prognose der THG-Emissionen des Folgetages ein Anreiz für die Flexibilisierung besteht, wurde dieser Anreiz nicht quantifiziert oder praktisch überprüft.
Möglichkeiten für Lieferanten, individuelle Tarife und Zusatzdienstleistungen anzubieten	Voll	Lieferanten können beliebige Logiken etablieren, wie das Matching erfolgt. Auch die Zusammensetzung des Anlagenparks etc. ist frei wählbar.
Manipulationsresistenz und Einhaltung zuvor definierter Regeln (z. B. Doppelvermarktungsverbot)	Voll	Zero-Knowledge Proofs gewährleisten die Einhaltung von zuvor definierten Regeln, solange diese für alle Beteiligten einsehbar und auch messbar sind.
Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Daten und Prozessen vor allem gegenüber prüfenden Behörden wie dem UBA.	Voll	Zuständige Behörden können die Prozesse und Daten so prüfen, ohne direkte Einsicht zu erhalten. Dies gewährleistet Datenschutz und Datensparsamkeit. Nach § 49 MsBG darf der jeweilige Lieferant bzw. Direktvermarktungsunternehmer personenbezogene Daten ihrer Kunden zum Zwecke der Belieferung verarbeiten.
Einhaltung des Datenschutzes und der Datensparsamkeit	Voll	
Skalierbarkeit	Teilweise	Bei ZKP handelt es sich um eine neue Technologie. Die Entwicklung der Skalierbarkeit schreitet stetig voran. Aktuell ist das vorgestellte System auf einige 100 Erzeuger und Verbraucher limitiert.
Kompatibilität zur Smart Meter Infrastruktur zur Vermeidung von Intermediären und Ineffizienzen bei	Konzept	Die Kompatibilität zur Smart Meter Infrastruktur ist konzeptionell ausgearbeitet worden. Im Feldversuch wurde aufgrund der Verfügbarkeit



<p>der Datenübertragung sowie der Gewährleistung von Abrechenbarkeit und geeichter Messwerte</p>		<p>und einfacheren Einbindung auf andere Wege der Datenerfassung zurückgegriffen.</p>
<p>Kompatibilität zum HKNR. Dafür wurde in [17] eine Roadmap entwickelt, wie sich das HKN-System weiterentwickeln muss, um wirklich kompatibel zu sein. Dies scheitert heute z. B. schon daran, dass keine digitalen Schnittstellen vorhanden sind.</p>	<p>Konzept</p>	<p>Die Kompatibilität zum HKNR wird in [17] ausführlich dargestellt. Heute fehlt einerseits die rechtliche Grundlage für die hier dargestellte Lösung und andererseits eine Reihe von Funktionalität im HKNR, um eine Kompatibilität sicherzustellen. Zu alternativen Lösungen wie EnergyTag, die das HKN(R) weiterentwickeln ist das vorgestellte System konzeptionell kompatibel [12], [15].</p>

## 7 Einsatz der Blockchain Technologie

In Abschnitt 3.1 wurde bereits kurz dargelegt, dass die alleinige Nutzung der Blockchain-Technologie, wenngleich deren Eigenschaften im Rahmen des Anwendungsfalles relevant sind, insbesondere aufgrund von Datenschutz ausscheidet. Dennoch spielt die Technologie als Teil der Lösung eine wichtige Rolle. Diese wird nachfolgend kurz skizziert und begründet.

- **Validierung von Zero-Knowledge Proofs:** Eine Smart-Contract-fähige Blockchain (technologieoffen) wird im Rahmen der InDEED-Lösung dafür eingesetzt, den seitens des Lieferanten erstellten kryptographischen Beweis zu validieren und das Ergebnis allen Stakeholdern zur Verfügung zu stellen. Der Vorteil daran ist, dass somit nicht jeder Stakeholder einzeln den ZKP verifizieren muss, sondern nur die Blockchain als „Verifier“ auftritt. Alternativ könnte dies auch mittels eines Intermediärs (z. B. einer vertrauenswürdigen Behörde) erfolgen.
- **Bewegungsdaten:** Im Rahmen der Lösung ist es erforderlich, dass Lieferanten als „Proofer“ und alle Stakeholder, die als „Verifier“ des ZKP auftreten, Zugang zu den dafür notwendigen Informationen erhalten (Transparenz). Diese Informationen umfassen die Zuordnung eines Smart Meters (oder einer digitalen Identität) einer Erzeugungsanlage zu einem Lieferanten bzw. dem HKNR, sollte die Anlage sich gegen den Opt-In in die InDEED-Lösung entscheiden (siehe Abschnitt 3). Überdies ist die Information erforderlich, ob eine Anlage eine EEG-Förderung erhält und damit dem Doppelvermarktungsverbot nach § 80 EEG unterliegt. Diese Daten müssen zum Zeitpunkt der Erstellung und der Prüfung des ZKP mit Zeitstempel vorliegen. Dabei kann der Prüfungszeitpunkt auch erst deutlich später sein. Daher muss sichergestellt sein, dass die Daten nachträglich nicht manipuliert werden können und historische Daten vollständig und unveränderlich vorliegen.
- **Stammdatenhaltung ohne Personenbezug:** Die Anmeldung der EE-Anlagen entweder beim HKNR oder dem Lieferanten sollte auf Basis der gleichen Datengrundlage erfolgen. Die dafür notwendigen Stammdaten sollten gepflegt und überprüft sein (z. B. Ort, Leistung, Typ der Anlage). Dies erleichtert die Anmeldung, vermeidet Dopplungen und Inkonsistenzen und dient als Basis für viele Anwendungen. Das Marktstammdatenregister (MaStR) erfüllt bereits grundsätzlich Teile dieser Anforderungen. Das MaStR leidet jedoch an Vertrauensproblemen insbesondere bei den dort eingepflegten Daten. Auch mangelt es an „Schnittstellen und automatisierten Möglichkeiten zur selektiven und barrierefreien Datennutzung für verschiedene Anwendungsfälle“ [16]. Dies kann z. B. über Maschinen-Identitäten und „Verifiable Credentials“ (dt. überprüfbare Anmeldeinformationen) erledigt werden. Ein Vorschlag dazu sowie die Nutzung von Blockchain wird in [16] beschrieben.

Die für die InDEED-Lösung nötigen Daten sind heute nicht in notwendiger Qualität mit den entsprechenden Schnittstellen verfügbar. Auch fehlt eine Verbindung zwischen den vorhandenen Datenquellen bzw. Anwendungsfällen (vgl. MaStR und HKNR). In [16] wurde bereits untersucht, dass für diese Fälle ein digitales Identitätsmanagement erforderlich ist. Zudem kamen die Autor:innen zu dem Schluss, dass „um Datensilos, die Risiken für Datenschutz, Verfügbarkeit und Marktmacht mit sich bringen, zu verhindern (...) dezentrale Architekturen zunehmend als potenzielle Basistechnologien der Digitalisierung des Energiemarktes“ gelten.

Es ist daher erforderlich, eine branchenweite Lösung zu entwickeln, um die grundlegenden Daten für eine Reihe von Anwendungsfällen (darunter die InDEED-Lösung) allen zur Verfügung zu stellen und eine Ende-zu-Ende Digitalisierung zu ermöglichen. Dies beinhaltet die Einführung von Maschinen-Identitäten, überprüfbaren Anlageninformationen zur Anmeldung („verifiable credentials“) sowie einheitlicher Datenhaltung in Registern, die allen Beteiligten zur Verfügung stehen.

Eine Darstellung, wie dieses zukünftige System aussehen kann, ist in Anlehnung an [16] in Abbildung 7-1 dargestellt.

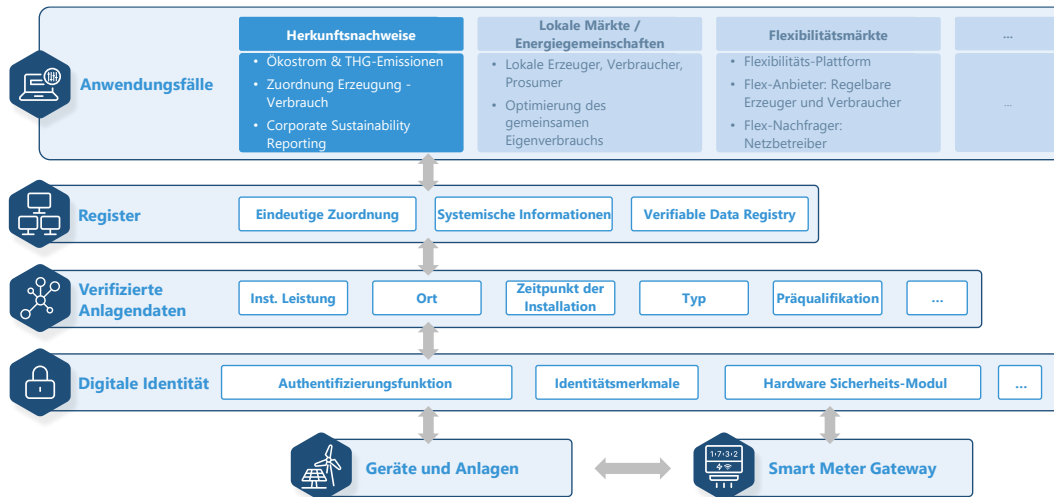


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung des digitalen Energiesystems der Zukunft

## 8 Fazit und Ausblick

Alles in allem zeigt sich, dass der Bedarf nach nachvollziehbaren, zeitlich und räumlich hochaufgelösten HKN stetig steigt. Wie in [17] dargelegt, ist es dafür unumgänglich, dass das System der HKN und die technische Umsetzung in Form des HKNR in den nächsten Jahren stark überarbeitet wird.

Die im Rahmen des Projekts InDEED konzeptionell entwickelte und implementierte Labeling-Lösung kann dabei ein Baustein sein, Kleinanlagen in das System zu integrieren. Das entwickelte System ist für die Nutzer:innen (Verbraucher und Erzeuger) einfach zu verwenden und ein geringer Aufwand ist nur im Rahmen der Registrierung nötig. Das Labeling selbst wird durch den Lieferanten durchgeführt. Über eine App oder Website können die Daten in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung dargestellt werden.

Während dies technisch ohne Weiteres machbar ist, stellt diese Lösung heute für externe Prüfungsorgane und Behörden noch eine „Black Box“ dar. Um die Richtigkeit zu prüfen wäre es nötig, Zugriff zu den Daten zu erhalten. Diese beinhalten jedoch im Falle von Prosumern häufig Personenbezug. Zudem handelt es sich schnell um große Datenmengen, die ausgetauscht und geprüft werden müssten. Diese Herausforderung wird in der entwickelten Lösung durch sog. „Zero-Knowledge Proofs“ gelöst. Dabei muss der Lieferant lediglich einen kryptographischen Beweis erbringen, den jede Partei, die die Richtigkeit prüfen möchte (verifier) schnell und einfach prüfen kann. In der entwickelten Lösung übernimmt ein Smart Contract diese Prüfung, sodass jeder das Ergebnis direkt einsehen kann.

Das System ermöglicht es nicht nur, dass die Stromherkunft aus Kleinanlagen kostengünstig gegenüber Verbrauchern nachgewiesen werden kann. Es vereinfacht auch die Abbildung der individuellen Stromherkunft, Energiegemeinschaften, lokale Strommärkte und neue Geschäftsmodelle für Lieferanten. Die ZKP erlauben es auch, die Kleinanlagen zu aggregieren und lokale Überschüsse in Form von HKN auf dem HKNR zu nutzen. Mittels an den individuellen Stromverbrauch und -herkunft gekoppeltem Treibhausgasnachweis und Vorhersage können darüber hinaus individuelle ökologische Fußabdrücke perspektivisch audittierbar abgebildet werden. Das System bietet damit auch einen Anreiz zur Lastverschiebung.

Der Feldtest zeigt, dass das Konzept praktisch realisierbar ist. Die Smart Meter Infrastruktur bietet hier die optimale Grundlage, da Daten geeicht und kryptographisch signiert übermittelt werden. Das heutige, teilweise im EU-Recht, teilweise in deutschem Recht sowie durch die technische Umsetzung limitierte HKN-System erschwert jedoch noch einen Produktiveinsatz. Das hier dargestellte System soll als Diskussionsgrundlage dienen, um, gemeinsam mit den in [17] dargestellten Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des HKNR, das Gesamtsystem neu zu gestalten.

In zukünftigen Projekten soll das System ausgebaut und in Richtung eines Produktivsystems entwickelt werden. Auch sollte insbesondere die Sektorenkopplung sowie die Integration ins HKNR oder alternative Systeme, wie beispielsweise im Rahmen von EnergyTag entwickelt, praktisch erprobt werden. Entscheidend für den Erfolg vieler technischer Lösungen, darunter der vorgestellten Labeling-Lösung ist es, dass einheitliche Register, Schnittstellen, Protokolle und Prozesse entwickelt werden, um eine Ende-zu-Ende-Digitalisierung zu ermöglichen. Die

Technologien dafür existieren bereits – z.B. mit Distributed Ledger Technologien, Zero-Knowledge Proofs und Self-Sovereign Identity.



# Abkürzungsverzeichnis

CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
EE	Erneuerbare Energien
EE-Anlagen	Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
GNDEW	Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende
HKN	Herkunftsnachweis
HKNR	Herkunftsnachweisregister
IEMD	DIRECTIVE (EU) 2019/944 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU
iMSys	Intelligentes Messsystem
MaStR	Marktstammdatenregister
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
MWh	Megawattstunde
OTC-Handel	Außerbörslicher Handel (engl.: over the counter)
PPA	Power Purchase Agreement
RED II	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (engl. Renewable Energy Directive II)
SMGW	Smart Meter Gateway
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt

ZKP	Zero-Knowledge Proof
-----	----------------------



# Literaturverzeichnis

- [1] Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG) § 42 Stromkennzeichnung, Transparenz der Stromrechnungen, Verordnungsermächtigung (EnWG §42). Ausgefertigt am 07.07.2005, Version vom 20.07.2017; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2017.
- [2] Energy Community Homepage. In <https://www.energy-community.org/>. (Abruf am 06.03.2023); Wien: Energy Community Secretariat, 2023.
- [3] Hauser, Eva et al.: Marktanalyse Ökostrom II - Marktanalyse Ökostrom und HKN, Weiterentwicklung des Herkunftsnachweissystems und der Stromkennzeichnung. Saarbrücken: IZES gGmbH, 2019.
- [4] EPEX SPOT SE: First pan-European GOs spot auction to take place in September 2022 - Press Release. Paris, Leipzig: EPEX SPOT SE, 2022.
- [5] EEX Group: Successful start of pan-European spot market for Guarantees of Origin - Press Release. Leipzig: EEX Group, 2022.
- [6] Reichmuth Matthias et al.: Marktanalyse Ökostrom - Endbericht. Leipzig: IE Leipziger Institut für Energie GmbH, 2014.
- [7] Entwurf eines Gesetzes zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW). Ausgefertigt am 11.01.2023; Berlin: BMWK, 2023.
- [8] Commission delegated regulation (EU) .../... of 10.2.2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin. Ausgefertigt am 10.02.2023; Brüssel: Europäische Kommission, 2023.
- [9] Das Projekt InDEED - Konzeption, Umsetzung und Evaluation einer auf Blockchain basierenden energiewirtschaftlichen Datenplattform für die Anwendungsfälle „Labeling“ und „Asset Logging“. In: <https://www.ffe.de/projekte/indeed/>. (Abruf am 11.05.2022); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2020.
- [10] Technische Richtlinie BSI TR-03109-1 - Anforderungen an die Interoperabilität der Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems (BSI TR-03109-1). Ausgefertigt am 21.12.2021, Version vom 16.01.2019; Bonn: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2019.
- [11] Bogensperger, Alexander et al.: Updating renewable energy certificate markets via integration of smart meter data, improved time resolution and spatial optimization in 17th International Conference on the European Energy Market (EEM2020). Stockholm, Sweden: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2020.
- [12] Granular Certificate Scheme Standard - Version 1. London: The EnergyTag Initiative Ltd, 2022.
- [13] Granular Certificates Use Case Guidelines - Version 1. London: The EnergyTag Initiative Ltd, 2022.
- [14] Sedlmeir, Johannes et al.: The Next Stage of Green Electricity Labeling: Using Zero-Knowledge Proofs for Blockchain-based Certificates of Origin and Use. In: ACM SIGENERGY Energy Informatics Review Volume 1 Issue 1, November 2021. Bayreuth: FIM Research Center, University of Bayreuth, 2021. <https://doi.org/10.1145/3508467.3508470>.
- [15] EnergyTag and granular energy certificates: Accelerating the transition to 24/7 clean power. London: The EnergyTag Initiative Ltd, 2021.
- [16] Mamel, Sara: Digitale Maschinen-Identitäten als Grundbaustein für ein automatisiertes Energiesystem - Aufbau eines Identitätsregisters auf Basis der Blockchain-Technologie (Pilot: Blockchain Machine Identity Ledger). Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2022.
- [17] Bogensperger, Alexander: Zukunftsfähige Herkunftsnachweise - Roadmap zur Weiterentwicklung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2023.

- [20] Bogensperger, Alexander Johannes: Assessing the Potential of Multiple Use Cases for German Energy Communities via Integration of Machine Learning in the Energy-Economic Modeling Process. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München - TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München: München, 2023.

# 9 Anhang

## 9.1 Prozesse im aktuellen HKN-System in Deutschland

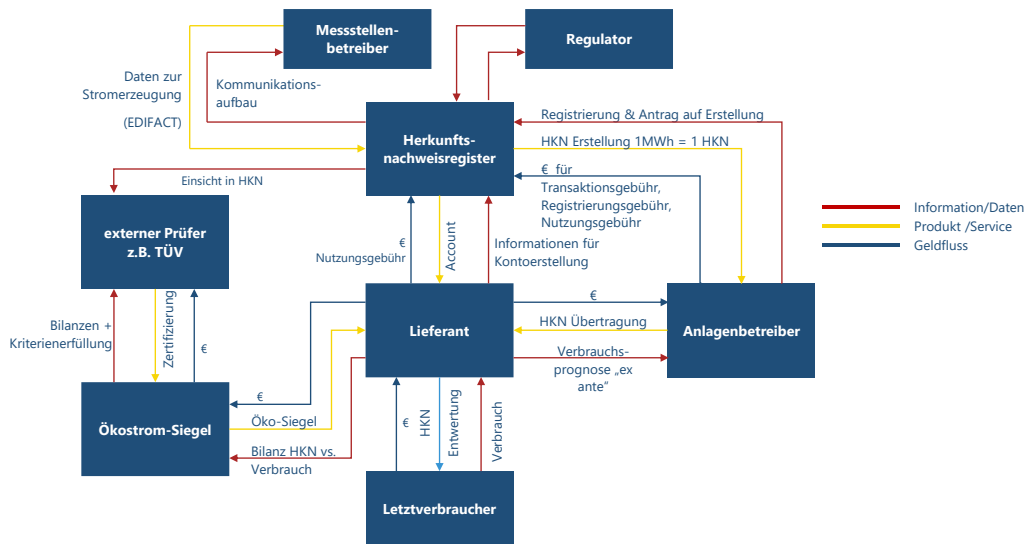


Abbildung 9-1: Prozesse im aktuellen HKN-System in Deutschland (Darstellung angelehnt an e<sup>3</sup>-value-Modell)