

# Grüner Wasserstoff für Industrie & Energie

Ergebnisse und Empfehlungen  
für Thüringen und  
darüber hinaus



FRIEDRICH-SCHILLER-  
UNIVERSITÄT  
JENA



H<sub>2</sub>-Technologien für die  
dezentrale Anwendung



H<sub>2</sub>-Technologien für die  
Abwasserreinigung



H<sub>2</sub> für die Transformation  
der Industrie

h<sub>2</sub>well  
Markthub

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt



wir! Wandel durch  
Innovation  
in der Region

# Inhaltsverzeichnis

1   Einordnung des Wasserstoffmarkthochlaufs .....	3
2   Wasserstoff im geopolitischen Kontext .....	5
3   Wasserstoffanwendung in den Sektoren .....	7
3.1   Stahlindustrie .....	7
3.2   Zementindustrie .....	11
3.3   Wärmeversorgung .....	15
3.4   Abwasserreinigung .....	18
4   Sektorenübergreifende Handlungsempfehlungen .....	21
Abkürzungsverzeichnis .....	26
Abbildungsverzeichnis .....	27
Quellen .....	28
Impressum .....	30



# Grüner Wasserstoff für Industrie & Energie – Ergebnisse und Empfehlungen für Thüringen und darüber hinaus

## Autor:innen

M. A. Fabian Pflügler | [fabian.pfluegler@uni-jena.de](mailto:fabian.pfluegler@uni-jena.de)

M. A. Anna Mehlis | [anna.mehlis@uni-jena.de](mailto:anna.mehlis@uni-jena.de)

M. A. Stephan Humbert | [stephan.humbert@uni-jena.de](mailto:stephan.humbert@uni-jena.de)

M. Sc. Phillip-Simon Keitel | [p.keitel@solarinput.de](mailto:p.keitel@solarinput.de)

Digital verfügbar in der „H2Thek – Wasserstoff in der Region!“ unter



## Zitierempfehlung

*Pflügler, Fabian; Mehlis, Anna; Humbert, Stephan; Keitel, Phillip-Simon (2026): Grüner Wasserstoff für Energie und Industrie- Ergebnisse und Empfehlungen für Thüringen und darüber hinaus. Erfurt, Jena. 02/2026.*

*Erarbeitet im Rahmen des Projektes „Wissenschaftlich-strategische Begleitung und Förderung der Marktdiffusion von Wasserstofftechnologien in der Innovationsregion (h2-well Markthub)“, gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Zeitraum 03/2023 - 12/2025.*

## Veröffentlichung

*Erfurt, Jena | 02/2026*

Gefördert durch:



# 1 | Einordnung des Wasserstoffmarkthochlaufs

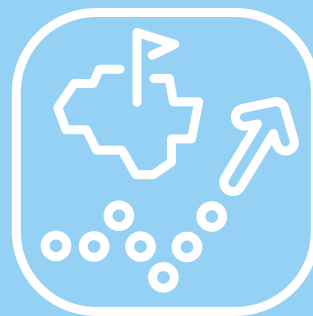
Autorin: Anna Mehlis

Die Transformation des Energiesystems hin zur Klimaneutralität stellt Deutschland wie auch die EU insgesamt vor tiefgreifende strukturelle Herausforderungen. Die ambitionierten Treibhausgasreduktionsziele **bis 2045** erfordern eine umfassende **Dekarbonisierung** aller energieintensiven Sektoren. Neben der direkten Elektrifizierung auf Basis erneuerbarer Energien wird dabei zunehmend deutlich, dass zusätzliche klimaneutrale Energieträger benötigt werden, um die **Energieversorgung langfristig sicher, flexibel und resilient** zu gestalten. **Grüner Wasserstoff** gilt in diesem Kontext als ein **zentraler Baustein** der Energiewende, da er als vielseitig einsetzbares Molekül mehrere Aufgaben gleichzeitig erfüllen kann: Er ist **speicherbar, transportfähig, sektorenkoppelnd** und ermöglicht die Bereitstellung **hoher Temperaturen** sowie **chemischer Grundstoffe**, die in bestimmten Anwendungen nicht durch elektrische Lösungen ersetzt werden können. Wasserstoff speichert viel Energie bei geringem Gewicht und kann – nach entsprechender

Aufbereitung – über bestehende oder angepasste Infrastrukturen wie Teile des Erdgasnetzes transportiert werden. Diese Eigenschaften machen Wasserstoff besonders **attraktiv für Industrieprozesse**, die sehr hohe Temperaturen benötigen oder Wasserstoff als Grundstoff einsetzen können, etwa in der **Stahl- oder Zementproduktion**. Auch im Wärmebereich kann Wasserstoff in spezifischen Anwendungsfällen eine Rolle spielen, insbesondere dort, wo leitungsgebundene Elektrifizierung an technische oder wirtschaftliche Grenzen stößt. Im Mobilitätssektor ist Wasserstoff ebenfalls relevant, vor allem im **Straßenschwerverkehr** sowie in Bereichen, in denen Batterietechnologien Einschränkungen hinsichtlich Reichweite, Ladezeiten oder Energiedichte aufweisen. Wasserstoff wird zukünftig auch für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen für den **Flug- und Schiffsverkehr** benötigt.

In der Systemperspektive unterstützt grüner Wasserstoff zudem die Integration **erneuerbarer Stromerzeugung**, da er Überschussstrom durch Elektrolyse in **speicherbare Moleküle** überführen kann. Diese **saisonale Speicherkapazität** wird mit zunehmendem Ausbau von Wind- und Solarenergie immer wichtiger und trägt zur **Versorgungssicherheit** bei.

Trotz dieser Potenziale steht der Wasserstoffmarkt heute vor einem **klassischen Henne-Ei-Problem**. Der Aufbau einer verlässlichen und wirtschaftlich tragfähigen Wertschöpfungskette erfordert simultane **Fortschritte auf mehreren Ebenen**: Die **Erzeugungskapazitäten** müssen ausgebaut und finanziert werden, während gleichzeitig **Transport- und Verteilinfrastrukturen** geschaffen werden müssen. Nutzer in Industrie, Mobilität, Wärmeversorgung und



Wasserwirtschaft benötigen **Planungssicherheit** hinsichtlich **Preis, Verfügbarkeit und regulatorischen Rahmenbedingungen**, um eigene Investitionen rechtfertigen zu können. Solange Anlagen für die Produktion von Wasserstoff nicht in großem Maß geplant und umgesetzt werden, bleibt jedes Kilogramm Wasserstoff teuer. Die hohen Preise halten die Nachfrage gering. Dies führt wieder dazu, dass keine großen Produktionsanlagen gebaut werden. Hinzu kommen **Unsicherheiten** in der Preisbildung, der regulatorischen Einordnung sowie der Zertifizierung

von Herkunft und Treibhausgasbilanz des eingesetzten Wasserstoffs. Obwohl der Bedarf perspektivisch stark steigen soll, ist **grüner Wasserstoff derzeit kaum vorhanden**. Aktuell wird Wasserstoff **fast ausschließlich aus Erdgas hergestellt** und ist damit grauer Wasserstoff, der erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht [1]. Klimaneutraler, grüner Wasserstoff lässt sich zwar durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom produzieren, doch die in Deutschland vorhandene **Elektrolysekapazität liegt mit etwa 0,185 Gigawatt** bei nur rund 2 % des bis 2030 angestrebten **Ziels von 10 Gigawatt** [2]. Selbst die anvisierten 10 Gigawatt werden nur einen Teil des Bedarfs decken können, weshalb zukünftig auch **Importe** entscheidend sind.

Neben grünem Wasserstoff gelten auch **blaue und türkise Varianten** als mögliche CO<sub>2</sub>-arme Übergangslösungen, sind aber noch kaum verfügbar und teils umstritten. Insgesamt zeigt sich ein deutliches **Missverhältnis zwischen dem politisch gesetzten Anspruch und der bislang realisierten Produktion**. Nach einem anfänglichen Hype um Wasserstoff entsteht aktuell ein **pessimistisches Bild** auf Grund fehlender staatlicher Investitionen und langfristigen

Rahmenbedingungen. Gleichzeitig hat sich der Diskurs entscheidend verschoben: **Es geht längst nicht mehr um die Frage, ob Wasserstoff ein relevanter Bestandteil des zukünftigen Energiesystems sein wird, sondern vielmehr darum, wie der Hochlauf effizient, sektorenübergreifend und marktkompatibel gestaltet werden kann**. Erfolgsfaktoren liegen unter anderem in der Transformation industrieller Kernprozesse, im **Ausbau erneuerbarer Energien**, in der Ausgestaltung regulatorischer Mechanismen sowie in der **Koordination regionaler, nationaler und europäischer Strategien**.

Der vorliegende **Leitfaden bündelt die Kernergebnisse des Projekts h2well Markthub im Bereich Industrie und Energie** und zeigt, wie der Markthochlauf in diesen zentralen Sektoren gestaltet werden kann. Damit soll er Orientierung für Akteure aus Industrie, Politik, Kommunen und Infrastrukturplanung bieten, die den Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft aktiv vorantreiben. Wie der Markthochlauf im **Bereich des Schwerlastverkehrs** gestaltet werden kann, wird in einem weiteren Leitfaden des Projektkonsortiums erläutert (veröffentlicht online in der [H2Thek](#)).

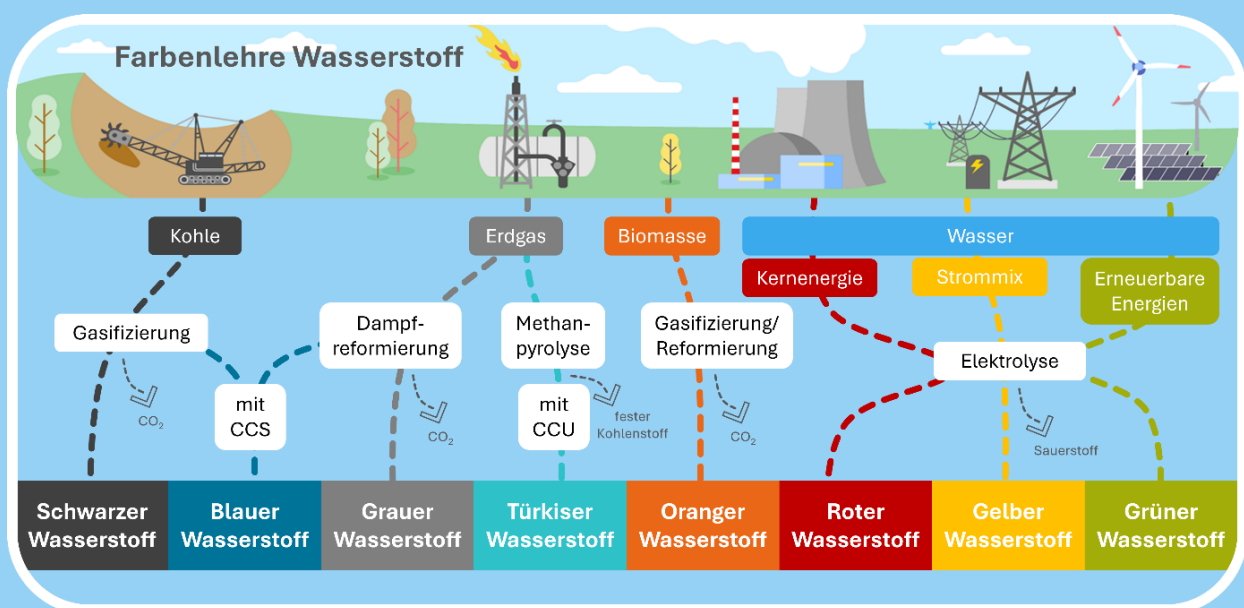


Abbildung 1: Herstellungsvarianten von Wasserstoff. Inhaltliche Quellen [3, 4], Illustration [4].  
Grafik: Hilde Teichmann 2025.

## 2 | Wasserstoff im geopolitischen Kontext

Autor: Fabian Pflügler

Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Analyse des Projekts *h2well Markthub* wurden Interviews mit **zentralen Akteuren** aus Unternehmen, regionalen Netzwerken und Verbänden geführt. Ziel war es zu verstehen, welche **Potentiale und Hemmnisse** bei der Umsetzung regionaler Wasserstoffprojekte im Vordergrund stehen. Aus der Auswertung der Interviews wurde ein **Mehrebenenmodell** entwickelt, das die zentralen Konfliktlinien beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft zeigt. Zur besseren Verständlichkeit wurden die Konfliktlinien den Ebenen zugeordnet, auf denen sie am häufigsten diskutiert werden. Auf jeder Konfliktlinie stehen sich die am weitesten entfernten Handlungsmöglichkeiten gegenüber. Das Modell hat die Form einer umgekehrten Pyramide, um zu verdeutlichen, dass der Druck auf der regionalen Ebene am größten ist. Hier werden **die regionalen Wasserstoffkonzepte tatsächlich umgesetzt**. Hier müssen alle

Entscheidungen der Ebenen darüber beachtet und bearbeitet werden.

In internationalen Abkommen wie dem **Pariser Klimaschutzabkommen** einigen sich Länder auf gemeinsame Klimaziele. Der Ausgangspunkt für grüne Technologien liegt daher auf der internationalen Ebene, wo sich auf der weltwirtschaftspolitischen Konfliktlinie die Pole CO<sub>2</sub>-intensiv und klimaneutral gegenüberstehen. Auf der supranationalen Ebene, die für die h2well-Region durch die Europäische Union bestimmt wird, zeigt sich die energiepolitische Konfliktachse zwischen erneuerbaren und fossilen Energien. Die EU setzt mit Programmen wie dem **Fit-for-55-Paket** konkrete Regeln für die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Einsatz von grünem Wasserstoff. Dabei definiert die EU streng, was als grüner Wasserstoff gilt. Aktuell wird lediglich Wasserstoff aus Elektrolyse mit erneuerbaren Energien als grüner Wasserstoff anerkannt, sogenannte Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO). Diese enge Definition ist

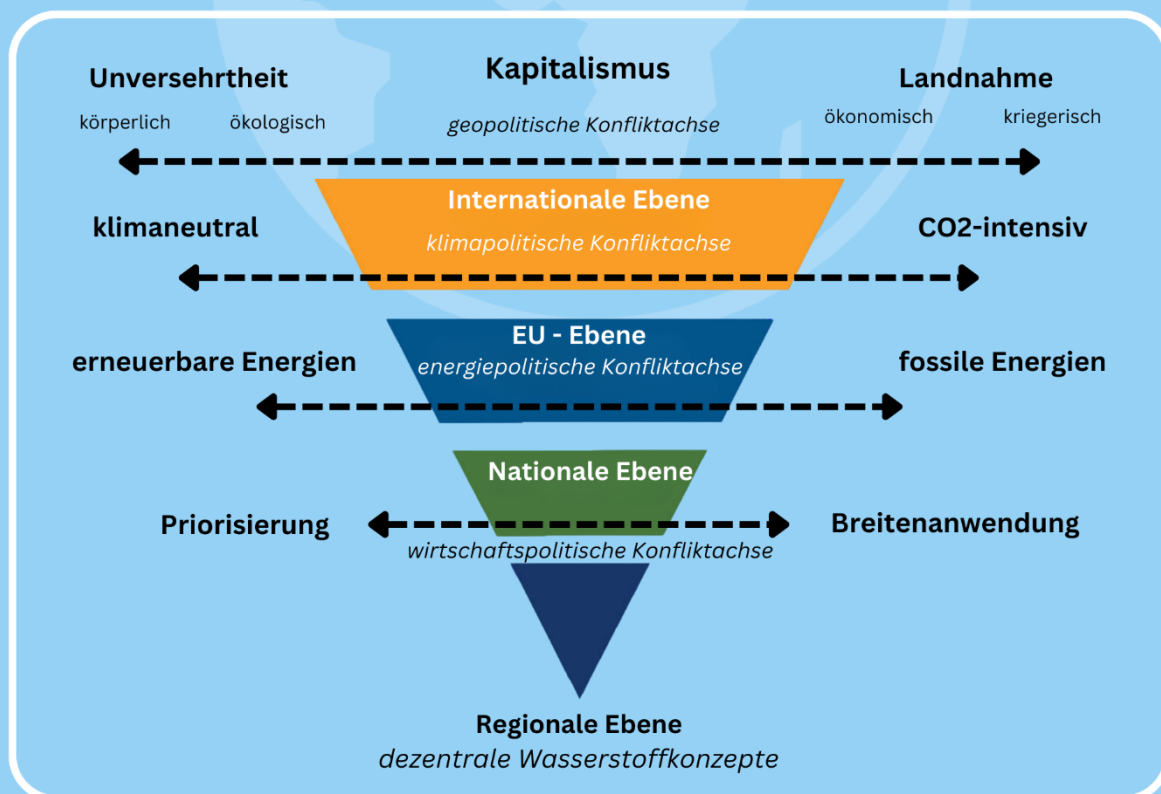


Abbildung 2: Konfliktachsen dezentraler Wasserstoffkonzepte im Mehrebenenmodell. Grafik: Fabian Pflügler 2025.

problematisch, da alternative Produktionswege aus landwirtschaftlichen Reststoffen wie **Biogas** ausgeschlossen werden, obwohl diese regionalen Produktionsverfahren teilweise bessere Treibhausgasbilanzen aufweisen und bedeutende Potenziale für die Versorgung mit grünem Wasserstoff bieten [5]. Auf der nationalen Ebene zeigt sich die wirtschaftspolitische Konfliktlinie zwischen Priorisierung und Breitenanwendung. Die **deutsche Wasserstoffstrategie** konzentriert sich auf Bereiche, in denen der größte Nutzen für den Klimaschutz entsteht. Deshalb werden Grundstoffindustrien wie Stahlwerke bevorzugt, da hier besonders viel CO<sub>2</sub> eingespart werden kann. Diese Strategie führt aber zu Konflikten zwischen großen und kleinen Unternehmen. Gleichzeitig konkurrieren verschiedene Anwendungsbereiche (Verkehr, Wärme, Industrie, etc.) um den knappen und teuren grünen Wasserstoff.

Überlagert werden diese drei Ebenen durch eine **geopolitische Konfliktachse**, die durch das globale kapitalistische Wirtschaftssystem bestimmt wird. Diese Linie thematisiert die Frage nach **körperlicher und ökologischer Unversehrtheit** unter kapitalistischen Wirtschaftsbedingungen. Diese Unversehrtheit ist allerdings schwer zu erreichen, da das kapitalistische System einen **strukturellen Zwang** zu kontinuierlichem Profitwachstum aufweist. Dieses Wachstum setzt die **fortlaufende Aneignung und Verwertung** natürlicher Ressourcen voraus – ein Prozess, der im Modell als **Landnahme** bezeichnet wird. Landnahme vollzieht sich dabei nicht nur durch ökonomische Expansion, sondern auch durch militärische Gewalt. Besonders fossile Rohstoffe wie **Erdöl und Erdgas** stehen im Zentrum dieser Auseinandersetzungen – um sie werden die meisten Kriege geführt. Doch auch Ressourcen für erneuerbare Energien werden aus geopolitischer Sicht immer wichtiger. Für Brennstoffzellen werden beispielsweise Platin, Kobalt und seltene Erden benötigt, die häufig in Regionen mit instabilen politischen Verhältnissen vorkommen.

Am Ende mündet das Modell in die regionale Ebene, wo die praktische Umsetzung der dezentralen Wasserstoffkonzepte passiert. Die **umgekehrte Pyramidenform** zeigt, dass der Handlungsdruck hier am größten ist. Ein Unternehmen steht vor der **Aufgabe**, gleichzeitig technisch richtig zu handeln, wirtschaftlich rentabel zu sein, die Bevölkerung mitzunehmen, europäische Gesetze einzuhalten, nationale Förderprogramme zu nutzen und dabei **regionale Arbeitsplätze** zu sichern. Gleichzeitig sind Unternehmen immer mehr damit konfrontiert, ob der produzierte Wasserstoff für **friedliche oder kriegerische Zwecke** verwendet werden soll, wie die im November 2025 verkündete Kooperation zwischen Greenlyte Carbon Technologies, Sunfire, INERATEC und Rheinmetall zur Produktion von CO<sub>2</sub>-neutralem synthetischem Kraftstoff für die militärische Verwendung zeigt [6].

Das Modell bietet einen kritischen Blick auf die Herausforderungen beim Aufbau einer dezentralen Wasserstoffwirtschaft. Es zeigt, dass das größte Problem das wirtschaftliche System selbst ist. **Fossile Energieträger** sind derzeit **zu günstigeren Preisen** verfügbar als grüner Wasserstoff. Dies ist ein zentrales Merkmal des kapitalistischen Weltwirtschaftssystems. Die derzeit noch teurere regionale Erzeugung von grünem Wasserstoff kann damit **kaum konkurrieren**, wenn sie nicht von staatlicher Seite eine große Unterstützung erfährt. Der **Solarstrom** zeigt, welches Potenzial in gezielter Förderung steckt: Durch massive staatliche Subventionen Chinas entwickelte er sich innerhalb von zwei Jahrzehnten von der teuersten zur **günstigsten Stromquelle** – während Deutschland seinen Vorsprung aufgab. Diese Fehler sollten sich bei Wasserstoff nicht wiederholen. Mit gezielter Förderung durch EU und Bund kann grüner Wasserstoff in den nächsten zehn Jahren Preise von etwa 3 Euro pro Kilogramm erreichen, eine wettbewerbsfähige heimische Industrie etablieren und gut bezahlte **Arbeitsplätze schaffen** [7].



## 3 | Wasserstoffanwendung in den Sektoren

### 3.1 | Stahlindustrie

Autoren: Fabian Pflügler, Anna Mehlis, Stephan Humbert

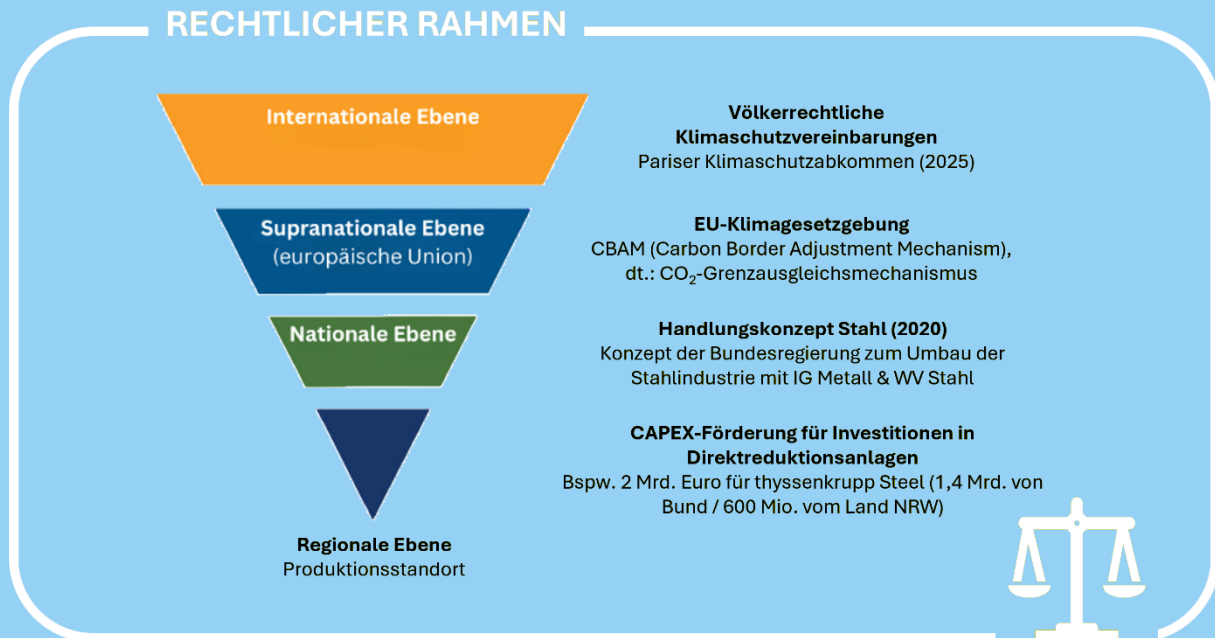


Abbildung 3: Gesetze, Richtlinien und Subventionen zur grünen Stahlproduktion im Mehrebenenmodell. Graphik: Fabian Pflügler 2025.

### EINSATZPOTENZIALE

Die Stahlindustrie steht besonders im Fokus der Dekarbonisierung, da sie etwa **30 Prozent** der **industriellen Emissionen** in Deutschland verursacht und damit für rund sieben Prozent der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist [8]. Der Umbau der Stahlproduktion ist damit einer der größten Hebel für die Dekarbonisierung der gesamten Industrie. Eine direkte Elektrifizierung der primären Stahlproduktion ist jedoch nicht möglich, weshalb grüner Wasserstoff als zentraler Energieträger für die Transformation unverzichtbar wird.



In Deutschland werden rund 70 Prozent des Stahls in der Primärstahlerzeugung gewonnen, die über die **Hochofen-Konverter-Route** erfolgt, bei der **Eisenerz** mit Koks- kohle zu Roheisen reduziert wird [9]. Dieses CO<sub>2</sub>-intensive Verfahren muss bis 2045 komplett klimaneutral werden. Dazu muss der Herstellungsprozess auf die Direktre- duktion von Eisenerz mit Wasserstoff umgestellt werden. Die großen deutschen

**Primärstahlhersteller** (Salzgitter Flachstahl, Stahl-Holding-Saar, thyssenkrupp steel) bauen dazu gerade neue Direktreduktionsanlagen, die bereits in den kommenden Jahren grünen Stahl produzieren sollen. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch den Einsatz von grünem Wasserstoff ist in diesem neuen Produktionsverfah- ren besonders effektiv: Pro Tonne grünem Wasserstoff können 28 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden [10].

Auch in der **Sekundärstahlproduktion**, bei der Stahl aus Stahlschrott im **Elektrolichtbogenofen** bereits deutlich emissionsärmer hergestellt wird, ist grüner Wasserstoff ein zentraler Baustein auf dem Weg zur Klimaneutralität. Er ersetzt Erdgas in Brennersystemen sowie in nachgelagerten Hochtemperaturprozes- sen der Weiterverarbeitung und adressiert damit die verbleibenden **30 Prozent** der Emissionen der deut- schen Stahlindustrie.



## ZUKÜNFTIGER WASSERSTOFFBEDARF DER STAHLINDUSTRIE

Die **Metastudie** „Emissionsfreie Stahlherzeugung“ von Albrecht et al. (2022) fasst mehrere Studien zur deutschen Klimaneutralität und deren Modellierungen zur Transformation der deutschen Stahlindustrie zusammen und vergleicht deren Gesamtenergiebedarfe. Die **Bedarfsprognosen** unterscheiden sich stark zwischen den verschiedenen Studien. Allein für die **stoffliche Nutzung** in der Direktreduktion (Primärstahl) zeigt sich im Jahr 2040 eine Bandbreite von etwa 35 TWh zwischen den Szenarien [11].

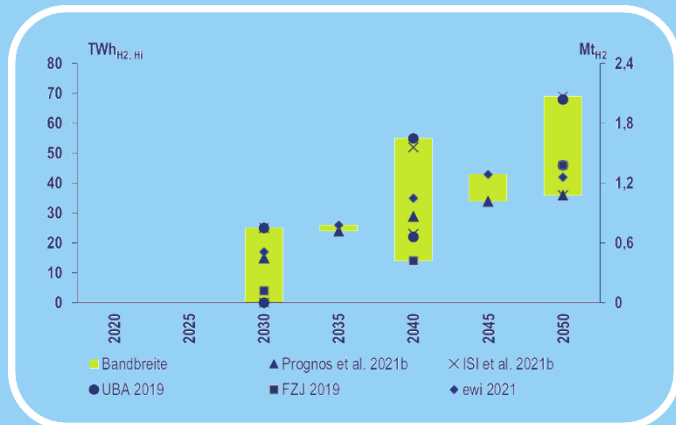


Abbildung 4: Bedarfsentwicklung für die Nutzung von Wasserstoff zur grünen Stahlherstellung durch Direktreduktion [11]

Für das Jahr 2050 geht die Studie von Albrecht et al. von einem Wasserstoffbedarf von etwa 70 TWh für die stoffliche Nutzung in Direktreduktionsanlagen und 33 TWh für die energetische Nutzung in Sekundärstahlproduktion und Weiterverarbeitung aus. Insgesamt also **rund 100 TWh** grüner Wasserstoff, die für die Produktion von grünem Stahl in Deutschland zukünftig jährlich benötigt werden. Zum **Vergleich**: Der gesamte Verkehrssektor in Deutschland wird 2045 einen Wasserstoffbedarf von 59 TWh haben [12]. Die Stahlindustrie allein benötigt in diesen Modellierungen also fast das Doppelte des gesamten Verkehrssektors.

### VOR- UND NACHTEILE

- + größter Hebel zur **CO<sub>2</sub>-Vermeidung**
- + **einzige Alternative** zur Dekarbonisierung
- + **Technologie vorhanden** und erprobt (DRI)
- + (finanzielle) **Unterstützung durch Politik**
- + **breite Unterstützung** in Belegschaften und Gewerkschaften
- + EU als globaler „**Vorreiter**“ für die **grüne Stahlproduktion**
- + konkrete Projekte **bereits in Umsetzung**
- + Grüne Stahlproduktion **sichert langfristig Beschäftigung**
- **große Mengen H<sub>2</sub> nötig** und **unsichere Verfügbarkeit**
- **hohe Kosten** für Energie und H<sub>2</sub>
- **hohe initiale Investitionskosten** (Umbau von Produktionsprozessen und Infrastruktur)
- **Profitinteressen** multinationaler Konzerne gefährden Transformationsvorhaben



*Hinweis: Detaillierte Analysen hierzu finden sich im Beitrag von Pflügler et al. (2025). Wasserstoff für die Stahlindustrie? Transformationskorporatismus, sozial-ökologische Konfliktachsen und Perspektiven im Betrieb.*

In: Dörre et al.: *Umkämpfte Transformation*. Frankfurt/New York: Campus Verlag.

## GRÜNER STAHL BRAUCHT GUTE ARBEIT

Grüner Wasserstoff kann nur Fuß fassen, wenn Beschäftigte als aktive Akteure an der Transformation beteiligt werden. So entstehen **gute, sichere und klimafreundliche Arbeitsplätze**. Die Transformation der Stahlindustrie bringt tiefgreifende **Veränderungen** und **Verunsicherungen** für rund 80.000 [8] direkt sowie 343.000 [13] indirekt Beschäftigte mit sich. Da das Beschäftigungsniveau seit Corona und der Energiepreiskrise weiter unter dem von 2020 [13] liegt, drohen Brüche in Erwerbsbiografien und der Verlust des Bildes der Stahlindustrie als Garant sicherer Arbeit. Eine **sozialverträgliche Gestaltung** der Transformation ist daher zentral: Technologische Modernisierung muss von **sozialem Ausgleich, transparenter Kommunikation** und **klaren Perspektiven** begleitet werden. Eindrücke aus jeweils einem Fallbeispiel der Primär- und Sekundärstahlroute legen folgende Ansatzpunkte für die Schaffung guter und sicherer Arbeitsplätze nahe.

Wesentlich ist der frühzeitige **Ausbau von Qualifikationen**, insbesondere Basiswissen zu Wasserstoff, um auf neue Anforderungen vorzubereiten und Unsicherheiten abzubauen. Angebote bestehen bereits, gleichzeitig sind innerbetriebliche Weiterbildung, Einbindung des Erfahrungswissens der Beschäftigten und Peer-to-Peer-Learning-Formate auszubauen. Für **Beschäftigungssicherung** braucht es reduzierte Arbeitszeiten, Altersteilzeit, Jobgarantien und leistungsgerechte Entlohnung zur Abwehr von Reallohnverlusten. **Tarifverträge** und **Montanmitbestimmung** bleiben zentrale Instrumente zur Durchsetzung von Interessen der Belegschaften.

**Transparenz** über die Auswirkungen des Wandels ist entscheidend: Betriebliche Mappings von Vulnerabilitäten und eine **strategische Personalplanung** unter Einbezug der Beschäftigten verhindern Konkurrenzdruck um vermeintlich sichere Stellen. Institutionalisierte Dialogformate (z. B. Erzählcafés) und Partizipation bei Personalplanung und Qualifizierung stärken Mitbestimmung und die Akzeptanz von Veränderungen.

Wichtig ist, an **Vorstellungen von guter Arbeit** anzuknüpfen: Viele Beschäftigte identifizieren sich mit ihrem Beruf und empfinden **Produzent:innenstolz**. Wenn Transformation als Abwertung oder Top-down-Entscheidung wahrgenommen wird, entstehen Blockaden. Positive Transformationserfahrungen lassen sich durch Partizipation, Workshops (z. B. zu Einsatzfeldern grünen Stahls) und die Berücksichtigung der Forderungen von Beschäftigten in strategischen Entscheidungen schaffen. Regionale **Einbettung und Einbindung** der Zivilgesellschaft – etwa in runden Tischen wie mit dem Stahlwerk Thüringen – stärken die soziale Kohäsion über den Betrieb hinaus.

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

### Infrastruktur & Technik

- Umbau zur Direktreduktion konsequent umsetzen
- Technologieübergang mit Beteiligung der Beschäftigten umsetzen
- Zügigen Anschluss an das Wasserstoffnetz ermöglichen

### Politische & regulatorische Maßnahmen

- **Grüne Leitmärkte schaffen**
  - o für die friedliche und nachhaltige Nutzung von grünem Stahl
  - o Nachfrage wird geschaffen und grüner Stahl wird trotz höherer Kosten konkurrenzfähig
  - o Grünes Beschaffungswesen etablieren und in öffentlichen Aufträgen umsetzen
  - o Bsp.: Schienen, Windkraftanlagen und weitere nachhaltige Infrastrukturprojekte



- **Quoten für lokal produzierten Stahl in Privatwirtschaft einführen**
- **Regionale grüne Stahlerzeugnisse konkurrenzfähig machen**
  - EU-Zollpolitik anpassen, um deutschen Stahl vor billigen Importen zu schützen
  - CBAM konsequent anwenden, um grünen Stahl wettbewerbsfähig zu machen
  - Kostenlose Zuteilung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten beenden
- **Eigentümerstrukturen transformationsgerecht anpassen:**
  - öffentliche Beteiligung ermöglicht Transformation (Bsp.: Salzgitter Flachstahl)
  - Verstaatlichung und Vergesellschaftung als wichtige Instrumente zur Gestaltung der Transformation

### Finanzielle Anreize & Förderprogramme

- **Investitionsförderung massiv ausbauen**
  - Staatliche Zuschüsse für neue Anlagen und Infrastrukturen müssen ausreichend sein
  - sowohl für große als auch für kleine Unternehmen
- **Betriebskostenförderung für grünen Wasserstoff konsequent umsetzen**
  - CCfD ausreichend finanzieren
  - Kostenlücke zwischen grünem Wasserstoff und fossilen Energien kann damit langfristig geschlossen werden
- **Förderung an ökologische, soziale und friedliche Kriterien binden**
  - Nachhaltigkeit in Produktion und Anwendung des Produkts denken (Rüstungsgüter bringen in ihrer Verwendung die Zerstörung der Natur und Tod von Menschen)
  - Keine öffentliche Förderung für grünen Stahl, der für Rüstungsgüter verwendet wird

### Beschäftigungs- und gesellschaftspolitische Maßnahmen

- **Beschäftigungsstandards erhalten:** Tarifbindung und Montanmitbestimmung stärken
- **Qualifizierungsbedarfe frühzeitig erkennen und strategisch planen**
  - Wissen und Wünsche der Beschäftigten integrieren
  - Wissens- und Qualitätsvorsprünge ausbauen
- **Transparente Kommunikation** von Auswirkungen der Transformation und aktive Einbindung von Beschäftigten in Entscheidungen
- **Transformation vom Hallenboden** zu denken, fördert ihre Akzeptanz und schafft gemeinsame Interessen statt Blockaden
- **Austauschformate** anbieten: Erzählcafés, runde Tische und Workshops
- **Sozialen Zusammenhalt** durch Einbettung der Betriebe in der Zivilgesellschaft stärken

## 3.2 | Zementindustrie

Autor: Phillip-Simon Keitel

### RECHTLICHER RAHMEN



### EINSATZOPTIONEN

Derzeit verursacht die Zementindustrie **20 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr** in Deutschland. Dies entspricht **circa 3 Prozent** der deutschen Gesamtemissionen und **11 Prozent der deutschen Industrieemissionen**. Der Prozessschritt, der die meisten Emissionen verursacht, ist der Klinkerbrennprozess. Hierbei entstehen insgesamt 84 Prozent der Emissionen, wovon wiederum **zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen prozessbedingt** aus der Entsäuerung des Kalksteins und ein Drittel



aus den Brennstoffen stammen. Bei der Erzeugung von Prozesswärme werden sowohl fossile Energieträger als auch alternative Brennstoffe (Autoreifen, Fluff etc.) verbrannt. Dieser Prozessschritt erzeugt etwa ein Drittel der prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. **Wasserstoff** könnte bis zu **10 Prozent beigemischt** werden, um so die Emissionen zu reduzieren. Um die Zementherstellung klimaneutral zu gestalten, müssen die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen **abgeschieden** werden. Diese könnten wiederum der Chemieindustrie als wichtige **Kohlenstoffquelle** dienen.

#### Wie kann das abgeschiedene CO<sub>2</sub> der Chemieindustrie zugeführt werden?

Das h2well Projekt „**Grüner Kalk**“ stellt sich dieser grundsätzlichen Herausforderung. Mit Hilfe von Wasserstoff soll das freigesetzte CO<sub>2</sub> gebunden, Emissionen verhindert und damit eine klimaneutrale Kalkproduktion begründet werden. Im ersten Verfahrensschritt wird das ausgetriebene CO<sub>2</sub> und (grüner) Wasserstoff (H<sub>2</sub>), durch einen Archaeenreaktor zu Methan (CH<sub>4</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) umgewandelt. Hierbei wandeln **Archaeen, einzellige Mikroben**, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> in Methan um. Da die Verbrennung von Methan in der energetischen Nutzung wiederum CO<sub>2</sub> freisetzen würde, soll in einem weiteren Schritt das Methan in einem Pyrolyseprozess zu Wasser (H<sub>2</sub>O) und Black Carbon (C) umgewandelt werden. Hierbei werden etwa 50 % des H<sub>2</sub> rückgewonnen. Das Black Carbon ist ein Feststoff bzw. Pulver und kann dadurch einfacher gelagert.

Diagram illustrating a chemical recycling process for lime (Kalk) using green electricity and hydrogen.

**Inputs:**

- Kalk  $\text{CaCO}_3$
- Grüner Strom (Green Electricity)
- Wasser (Water)
- $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$  (PEM, 5600 kWh/t( $\text{CO}_2$ ))

**Process Flow:**

- Kalkofen (Lime Kiln):**  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Recycles  $\text{CO}_2$ .
- Archaeenreaktor (Archaea Reactor):**  $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$  (Exotherm). Recycles 50% of  $\text{H}_2$ .
- Membranreaktor (Membrane Reactor):** Produces Methan from  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$ .
- Pyrolyse (Pyrolysis):**  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2 \text{H}_2$ . Produces Carbon Black and recycles  $\text{CO}_2$  back to the Kalkofen.

**Outputs:**

- Kalk  $\text{CaO}$
- Carbon Black
- Wasser (Water)

**Notes:**

- Keine fossilen Brennstoffe (No fossil fuels)
- Elektroofen (Electric furnace)
- Reine  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre (Pure  $\text{CO}_2$  atmosphere)

Neben der Chemieindustrie gilt es die **Landwirtschaft** für die Abnahme des Carbon Black zu adressieren. Carbon Black kann als Grundstoff für die Erzeugung von **Terra Preta** (portugiesisch für schwarze Erde) verwendet werden und somit zur Stabilisierung und Verbesserung von Böden beitragen. Die Landwirtschaft als Abnehmer von Carbon Black stellt ein enormes Potenzial dar, das es auszuschöpfen gilt.

- + **Substitution** von Erdgas
  - Aktuell hohe H<sub>2</sub>-Kosten
- + Wasserstoffeinsatz zur **Erzeugung von festem Kohlenstoff** (Methanisierung + Pyrolyse)
  - Unsichere **Mengenverfügbarkeit**
  - Enorme **Preissteigerung** des Zements
- + Dekarbonisierung von **CO<sub>2</sub>-Punktquellen**
  - Fehlendes **Personal** für Umrüstung
- + Möglichkeit zur **Anpassung** bestehender Anlagen
  - Unsicherheiten in der **Finanzierung**
  - Nicht vorhandener grüner **Kohlenstoffmarkt** (bei CCU)
- + Ertüchtigung vorhandenes **Erdgasnetz**
  - **TRL** aktuell sehr niedrig
- + Nutzung der **Abwärme**
- + **Aufwertung** von CO<sub>2</sub> durch CCU

## EINSCHÄTZUNGEN DER BRANCHE

Wasserstoff nimmt im Kontext der **Dekarbonisierung der Zementindustrie** derzeit lediglich eine marginale Rolle ein. Sein Einsatz wird aktuell primär als begrenzter Beitrag zur Bereitstellung von Prozesswärme bewertet. Demgegenüber besitzen regulatorische Vorgaben im Bereich **Carbon Capture and Storage (CCS)**, **Carbon Capture and Utilization (CCU)** sowie der **CO<sub>2</sub>-Abscheidung** eine deutlich höhere Relevanz für die zukünftige Transformationspfadgestaltung der Branche.

Das Abscheiden und Verpressen des CO<sub>2</sub> unter der Erde wird jedoch kritisch diskutiert. Ausreichend dimensionierte und sichere Lagerstätten für die zu erwartenden Mengen CO<sub>2</sub> gibt es nicht. Die mit CCS verbundenen Risiken für die Natur, erhalten in aktuellen Debatten nicht die **notwendige Priorität**. **Wirtschaftliche Zwänge** und Druck zur Dekarbonisierung führen zu einem schnellen, risikoreichen Handeln. Technologische Ansätze wie **Methanisierung oder Pyrolyse** sind bislang kaum etabliert und ihre potenzielle Bedeutung für den Sektor ist weitgehend unerforscht. Darüber hinaus stellen die hohen Transformationskosten der Standorte sowie die eingeschränkte **Verfügbarkeit von Wasserstoff** in großtechnischen Mengen erhebliche ökonomische und infrastrukturelle Herausforderungen dar. Ein umfassender Einsatz von Wasserstoff würde unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen die Gesamtkosten der Transformation daher signifikant erhöhen.

Die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der im h2-well-Link untersuchten Zement- und Kalkproduktionsstandorte Bernburg, Kasendorf, Azendorf und Deuna betragen insgesamt rund 1,77 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Für den Standort Deuna ist die **Abscheidung von etwa 620.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr** vorgesehen, was etwa **62% der derzeitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen**, des Standortes, ausmacht. Die vollständige Reduktion dieser CO<sub>2</sub>-Menge zu elementarem Kohlenstoff erfordert, gemäß stöchiometrischer Berechnungen einen Wasserstoffeinsatz von 113.665 t H<sub>2</sub>. „Das bedeutet **eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen** des Landes Thüringen aus Industrie, Gewerbe und Energieumwandlung um mehr als 20 %.“ [14]

Wird die gesamte im h2-well-Link anfallende CO<sub>2</sub>-Fracht von 1,77 Mio. t CO<sub>2</sub> einer entsprechenden Umwandlung unterzogen, ergibt sich ein gesamter Wasserstoffbedarf von etwa 311.932 t H<sub>2</sub>.

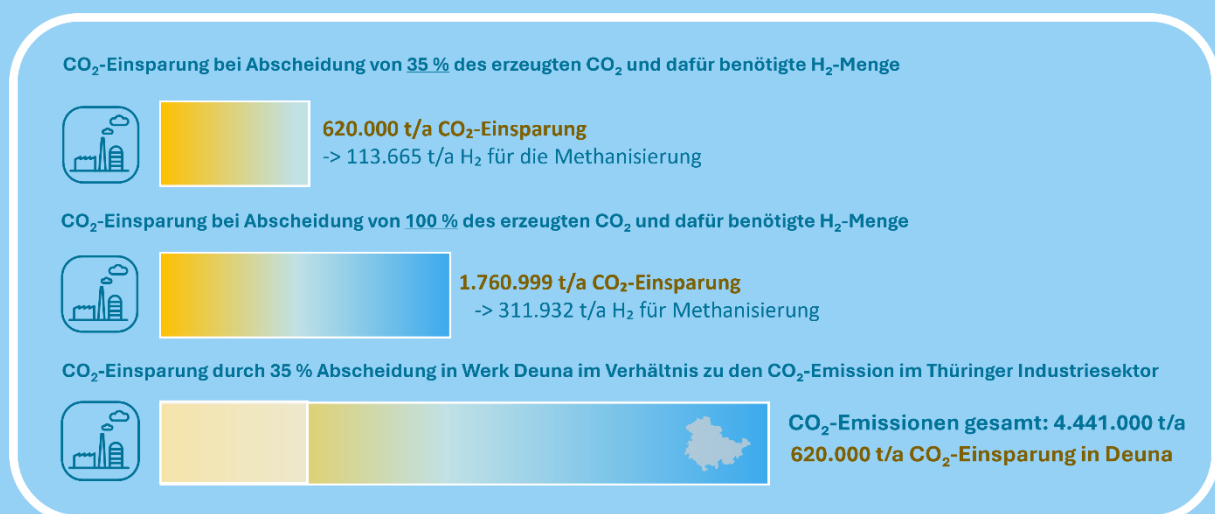


Abbildung 6: CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial durch Methanisierung am Standort Deuna. Eigene Berechnung auf Grundlage von Expert:inneninterviews und Angaben des Thüringer Landesamtes für Statistik. Grafik SolarInput e.V. 2025.




## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die **Dekarbonisierung der Zementindustrie** ist eine enorme Aufgabe und mit erheblichen Herausforderungen verbunden. **Steigende CO<sub>2</sub>-Preise** erhöhen den wirtschaftlichen Druck auf die Unternehmen deutlich. Gleichzeitig erfordert die Transformation der Produktionsstandorte enorme Investitionen, lange Planungszeiträume und komplexe Genehmigungsverfahren. Zusätzlich verschärft Konkurrenz aus Nicht-EU-Staaten den Wettbewerbsdruck.

Ein Schritt zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist die Nutzung alternativer Brennstoffe zur Erzeugung von Prozesswärme, welche kontinuierlich steigt. Diesen **Brennstoff durch Wasserstoff** vollständig zu substituieren ist unwahrscheinlich. Eine **Beimischung von etwa 10%** gilt als sicherer.

Zielführender ist die Nutzung abgeschiedener CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche in erheblichem Umfang anfallen. Hier kann der Einsatz von Wasserstoff einen signifikanten Beitrag leisten.

### Politische & regulatorische Maßnahmen

- 
- Die erforderlichen Mengen dauerhaft zu wirtschaftlich attraktiven Preisen zuverlässig bereitstellen.
  - Vereinfachte Genehmigungsverfahren zu Umsetzung von CCU.
  - Gesetzliche Vorgaben zur priorisierten Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Industrieprozessen.
  - Gesetzliche Regelungen, um notwendige Investitionen in Abscheidungs- und Speichersysteme planbarer zu gestalten.
  - Regulatorischen Rahmen geben für nachhaltige Lösungen wie CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Transport.
  - Verpflichtende Nutzung CO<sub>2</sub>-armer Zementprodukte.
  - Regelung zum leichteren Recycling von Kalk- und Zementprodukten und Quoten.

### Finanzielle Anreize & Förderprogramme

- Stärkere finanzielle Förderung zur Transformation von CO<sub>2</sub>-Punktquellen.
- Subvention zur Nutzung CO<sub>2</sub>-armer Zementprodukte.
- Bonusprogramme für Bauherren, die grüne Zementprodukte nutzen.

### Infrastruktur & Technik

- Ausbau der Transportinfrastruktur von CO<sub>2</sub> und dessen Folgeprodukten.
- Weiterentwicklung von chemischen Verfahren zur Nutzung abgeschiedenen CO<sub>2</sub>
- Integration der Abwärme in nahegelegene Wärmeinfrastruktur.
- Prozess der Kohlenstoffgewinnung aus abgeschiedenem CO<sub>2</sub> als erweiterten Produktionsschritt etablieren.

### Wissen & Umsetzung

- Vermarktung der grünen Zementprodukte.
- Prozess der Kohlenstoffgewinnung aus abgeschiedenem CO<sub>2</sub> als erweiterten Produktionsschritt der Industrie und Bevölkerung zugänglich machen.



### 3.3 | Wärmeversorgung

Autor: Phillip-Simon Keitel

#### RECHTLICHER RAHMEN

EU-EBENE	BUNDESEBENE	LANDESEBENE
<b>Europäisches Klimagesetz (2021)</b> Verbindliche THG-Reduktionen	<b>Klimaschutzgesetz 2021 (KSG)</b> Reduktion der THG-Emissionen und Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045	<b>Thüringer Klimagesetz (ThürKlimaG, 2018)</b> Verpflichtung der Wärmeversorger zur Erarbeitung von Transformationspfaden bzw. Wärmenetzstrategien
<b>Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III, 2023)</b> Quoten zur Erzeugung von Wärme aus EE, Ausbau der Fernwärme um 2,2 % pro Jahr in der Zeit von 2021 - 2030	<b>Wärmeplanungsgesetz (WPG, 2024)</b> Verpflichtung der Bundesländer zur Dekarbonisierung der Wärmenetze; Einreichung der kommunalen Wärmepläne bis 30.06.2026 / 30.06.2028	<b>Thüringer Ausführungsgesetz zum Wärmeplanungsgesetz (ThürWPAG, 2024)</b> Gesetz zur Umsetzung des WPG
<b>Energy Performance of Buildings Directive (EPDB, 2021)</b> Richtlinie zur Energieeffizienz von Gebäuden	<b>Gebäudeenergiegesetz (GEG, 2023)</b> Quoten für die Einsatz von EE in der Wärmeversorgung von Gebäuden	



#### EINSATZOPTIONEN

Wasserstoff kann in der kommunalen und industriellen Wärmeversorgung in mehreren Anwendungsfeldern einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Drei zentrale Einsatzbereiche sind dabei hervorzuheben:

##### Kommunale Wärmeversorgung (u. a. Nah- und Fernwärmesysteme):

Wasserstoff kann als **Brennstoff in KWK-Anlagen, Wasserstoffturbinen** oder **hybriden Power-to-Heat-Systemen** eingesetzt werden. Er ermöglicht eine CO<sub>2</sub>-freie Wärme- und Stromproduktion und bietet insbesondere in bestehenden **gasbasierten Wärmenetzen** eine Option zur Nutzung vorhandener Infrastrukturen. Zudem kann Wasserstoff indirekt zur Netzstabilisierung beitragen, etwa durch seine Nutzung in Elektrolyseuren kombiniert mit Großwärmepumpen oder Elektrodenkesseln.

##### Private Haushalte:

Im Gebäudesektor kann Wasserstoff entweder direkt als Brennstoff in **angepassten Heizthermen** genutzt werden oder indirekt über synthetische gasförmige Energieträger (Power-to-Gas). Aufgrund infrastruktureller Anforderungen und Effizienzüberlegungen wird der direkte Einsatz jedoch überwiegend in Pilotregionen oder in Bestandsquartieren mit vorhandenen Gasnetzen diskutiert. Perspektivisch spielt Wasserstoff vor allem dort eine Rolle, wo andere Wärmetechnologien technisch oder wirtschaftlich nicht umsetzbar sind.

##### Industrieprozesse mit potenzieller Abwärmenutzung:

In energieintensiven Industrien – beispielsweise in der Zement-, Kalk-, Glas- oder Stahlproduktion – dient **Wasserstoff als emissionsfreier Hochtemperaturbrennstoff** oder als Reduktionsmittel. Die im Prozess entstehende Abwärme kann über Wärmenetze in die kommunale Wärmeversorgung integriert werden, wodurch sektorübergreifende Effizienzgewinne erzielt werden. Diese Kopplung von industriellen Wasserstoffanwendungen und kommunaler Wärmeversorgung gilt als besonders vielversprechend für die energetische Systemoptimierung.

## VOR- UND NACHTEILE

- + Einsatz in der **Fernwärme**
- + Hoher Anteil potenzieller Nutzer
- + Aufbau dezentraler H<sub>2</sub>-Infrastruktur
- + Anpassung bestehender Anlagen
- + Ertüchtigung vorhandenes **Erdgasnetz**
- + **Anschluss an das H<sub>2</sub>-Kernnetz möglich**
- + Einsatz bei **Lastspitzen**
- + Alternative zu anderen nachhaltigen Energiequellen (Geo-und Flussthermie, Abwärme...)
- Aktuell hohe H<sub>2</sub>-Kosten
- Aktuell notwendige H<sub>2</sub>-Mengen nicht verfügbar
- Fehlende Finanzierungsbereitschaft der Banken
- Konkurrenz zu anderen **Energieträgern**
- Fehlendes **Personal** für Umrüstung
- Weiterer Ausbau **EE-Anlagen nötig**
- Erst mittelfristiger Anschluss an das **Kernnetz**

## EINSCHÄTZUNGEN DER BRANCHE

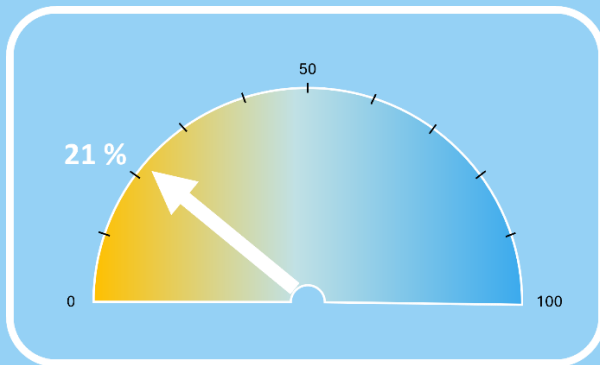
Für die Abschätzung zukünftiger **Wasserstoffbedarfe** sowie zur Auslegung der hierfür erforderlichen Energieinfrastrukturen durchlaufen Kommunen den Prozess der kommunalen Wärmeplanung. Aufgrund stark variierender struktureller, energetischer und infrastruktureller Ausgangsbedingungen werden dabei unterschiedliche Entwicklungsszenarien betrachtet.

Ein mögliches Szenario sieht die kombinierte Nutzung verschiedener **erneuerbarer Energieträger** vor, in dem Wasserstoff einen **ergänzenden Baustein** darstellt. Aufgrund seiner hohen Speicherkapazität und der flexiblen Einsatzmöglichkeiten eignet sich Wasserstoff insbesondere zur Deckung von Lastspitzen und zur Sicherstellung der Versorgung in Zeiten geringer erneuerbarer Stromerzeugung (z. B. Dunkelflauten). Ein weitergehendes Szenario umfasst die vollständige Transformation des lokalen Wärmesystems auf Wasserstoff. Dieses Modell setzt jedoch eine **entsprechende Energieinfrastruktur** voraus und ist daher vor allem für Kommunen mit direktem Zugang zum nationalen oder regionalen Wasserstoffkernnetz realistisch. Kommunen ohne Anbindung an dieses Kernnetz und mit überwiegend dezentralen Versorgungsstrukturen berücksichtigen ein wasserstoffdominiertes Wärmesystem seltener, da hierfür die **Bereitstellung, der Transport und die Speicherung** von Wasserstoff auf lokaler Ebene deutlich höhere logistische und wirtschaftliche Anforderungen mit sich bringen. Trotz des Ausbaus der Wasserstoffkernnetzes ist noch nicht abzusehen ab wann, in welchen Mengen und zu welchem Preis Wasserstoff verfügbar sein wird.

## ZUKÜNFTIGER WASSERSTOFFBEDARF IN DER WÄRMEVERSORGUNG

Die im Jahr 2022 in Thüringen veröffentlichte Wärmenetzstrategie bildet die Grundlage für die spätere kommunale Wärmeplanung. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden der Status quo aller **Fernwärmebetreiber** erhoben und mögliche Transformationspfade für die zukünftige Wärmeversorgung entwickelt. Dabei zeigte sich, dass derzeit rund **49 % der Wärmeversorgung** in Thüringen auf Erdgas basieren. Dies umfasst sowohl gasbetriebene Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen als auch die dezentrale Wärmeerzeugung in Haushalten.

Die vorhandene Infrastruktur – darunter zahlreiche Blockheizkraftwerke – könnte perspektivisch auf Wasserstoff umgerüstet oder durch neue wasserstofffähige Anlagen ersetzt werden. Zudem stellen die etwa 6.082 km **Erdgasleitungen** in Thüringen ein **grundsätzlich nutzbares Potenzial** dar, das jedoch überprüft und, falls erforderlich, technisch ertüchtigt werden müsste. [15]



Für das Jahr 2040 wird prognostiziert, dass rund **21 % der Fernwärmeerzeugung weiterhingasbasiert** sein werden, wobei Wasserstoff eine wichtige Rolle spielen soll. Besonders Städte wie Erfurt und Jena betrachten diesen Energieträger als eine **zentrale Säule ihrer zukünftigen Wärmeversorgung**. [16]

Abbildung 7: Anteil auf grünem Gas basierenden Anlagen zur Fernwärmeerzeugung bis 2040.

Grafik: SolarInput e.V. 2025.

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

„Die **Umstellung eines bestehenden Systems** auf eine alternative Befeuerung bedarf auch einer Anpassung der zugehörigen Infrastruktur. Für die Nutzung von Wasserstoff kann es beispielsweise notwendig sein die bestehende Infrastruktur anzupassen, zu ergänzen oder neu aufzubauen. Zu dieser Infrastruktur gehört auch die **Speichertechnologie und Versorgung**, welche anhand des Bedarfs bestimmt wird.“ [17]

Für die Transformation der Wärmeversorgung braucht **Versorgungssicherheit** mit Wasserstoff zu wirtschaftlich leistbaren Konditionen, **flexiblere Lösungen der Wärmeversorgung** und **Förderprogramme zur Anpassung der Systeme**.

### Politische & regulatorische Maßnahmen

- Priorisierung von H<sub>2</sub> zur Abdeckung von Spitzenlasten in Rechtrahmen einbinden.
- Versorgungssicherheit zentral und dezentral herstellen.

### Finanzielle Anreize & Förderprogramme

- Finanzielle Anreize / Förderung zur Anpassung / Ertüchtigung bestehender Systeme.
- Finanzielle Förderung zur Umrüstung auf Wasserstofftechnologie im privaten Sektor.
- Subvention der Wasserstoffproduktion, um Verbrauchspreis zu senken.
- Neben CAPEX auch OPEX-Förderprogramme für Betriebskosten und H<sub>2</sub>-Transport einführen.
- Förderung des Aufbaus der dezentralen Erzeuger- und Verbraucherinfrastruktur.

### Infrastruktur & Technik

- Ertüchtigung bestehender Erdgasleitungen für den Wasserstofftransport.
- Anpassung der Verdichter für den leitungsgebunden Transport.
- Anpassung bestehender BHKW auf Wasserstoff.

### Wissen & Umsetzung

- Wissenstransfer zum Einsatz, Sicherheit und Kosten von H<sub>2</sub> für private Haushalte.
- Befähigung von Personal zur Bewertung von H<sub>2</sub>-Technologien in Genehmigungsbehörden und Fachämtern.
- Öffentlichkeitsarbeit zur Sektorenkopplung und Power-to-X.

## 3.4 | Abwasserreinigung

Autor: Phillip-Simon Keitel

### RECHTLICHER RAHMEN



### EINSATZOPTIONEN

Gemäß der neuen Kommunalabwasserrichtlinie (KARL) sind alle Kläranlagen mit einer Kapazität von mehr als 150.000 Einwohnerwerten (EW) verpflichtet, bis spätestens 2045 schrittweise mit einer vierten Reinigungsstufe ausgerüstet zu werden. Für kleinere Anlagen im Bereich zwischen 10.000 und 150.000 EW wird im Rahmen eines risikobasierten Bewertungsverfahrens ermittelt, ob auch dort ein entsprechender Ausbau erforderlich ist. Auch für diese Anlagen ist ein gestufter Implementierungsprozess bis 2045 vorgesehen. Im Forschungsvorhaben PHO2ZON des HySON-Instituts in Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar wurde ein innovatives **Verfahren zur Ozonbehandlung von kommunalem Abwasser** auf der Versuchskläranlage Sonneberg-Heubisch untersucht. Dabei wurde erforscht, inwieweit **Sauerstoff**, der **als Nebenprodukt der Wasserstoffelektrolyse** anfällt, in Ozon überführt und mittels photokatalytischer Prozesse in der **Abwasserreinigung** eingesetzt werden kann. Ziel dieses Ansatzes ist die Entwicklung einer ökonomisch vorteilhaften Alternative zu den bislang etablierten, jedoch kostenintensiven Verfahren der vierten Reinigungsstufe. Durch diese Form der Sektorenkopplung ergibt sich zudem das Potenzial, den Ausbau einer dezentralen Wasserstoffinfrastruktur zu unterstützen, indem das Nebenprodukt der Elektrolyse - Sauerstoff - synergetisch genutzt wird.

### VOR- UND NACHTEILE

- |  |  |
|--|--|
| + Sektorenkopplung: <b>vierte Reinigungsstufe</b> und <b>Wasserstoffproduktion</b> | - Niedriger <b>Technologiereifegrad</b>                                  |
| + Hoher <b>Bestand</b> an Kläranlagen  | - vereinzelte Kläranlage zur <b>vierten Reinigungsstufe</b> verpflichtet |
| + Aufbau dezentraler H <sub>2</sub> -Infrastruktur                                 | - Noch fehlende H <sub>2</sub> -Abnehmerstruktur                         |
| + Nähe zu EE-Erzeugern ( <b>Off-Grid-Lösung</b> )                                  | - Umsetzung in <b>Bundesrecht</b> steht noch aus                         |
| + Ökonomische <b>Aufwertung</b> der Kläranlagen                                    | - Konkurrenz zu <b>etablierten Systemen</b>                              |
| + <b>Verpflichtung zur vierten Reinigungsstufe</b>                                 | - <b>Flächenverfügbarkeit</b> auf den Klärwerken                         |
| + <b>Kostenbeteiligung durch „Hersteller von Spurenstoffen“</b>                    | - Notwendiger Ausbau <b>EE-Anlagen</b>                                   |

## EINSCHÄTZUNG DER BRANCHE

Für das Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie, Naturschutz und Forsten (TMUENF) hat die Einführung der vierten Reinigungsstufe derzeit noch eine **vergleichsweise geringe Priorität**. Hintergrund ist, dass die Vorgaben der Kommunalabwasserrichtlinie zunächst in Bundes- und anschließend in Landesrecht überführt werden müssen. Entsprechend wird der unmittelbare Handlungsbedarf aktuell als niedrig eingeschätzt, zumal **erst ab 2033** 20 % der Kläranlagen über eine vierte Reinigungsstufe verfügen müssen. [18] Zudem steht die Einführung dieser Stufe in Konkurrenz zu dringend **notwendigen Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen** in einer vielerorts überdimensionierten Abwasserinfrastruktur Thüringens. Ab 2028 tritt die erweiterte Herstellerverantwortung für Pharma- und Kosmetikunternehmen in Kraft. Wie diese konkret umgesetzt werden soll und wie die entstehenden Kosten verteilt werden, ist bislang ungeklärt. Es gilt jedoch als sicher, dass sich die betroffenen Hersteller gegen eine umfassende Kostenübertragung wehren werden. Bisher liegt dem TMUENF lediglich eine Auswertung der Kläranlagen ab 150.000 Einwohnerwerten (EW) vor. Für Anlagen ab 10.000 EW mit erhöhten Spurenstoffbelastungen müssen die Daten erst noch erhoben werden – ein Prozess, der erhebliche personelle und finanzielle Ressourcen erfordert. Der **Einsatz wasserstoffproduzierender Technologien an Kläranlagen** wird in Fachveranstaltungen zunehmend diskutiert und stößt auf **positive Resonanz**. Dennoch bleibt die Technologie für viele Akteure **weitgehend unbekannt**. Es fehlen praktische Erfahrungswerte, und sowohl die Produktionskapazitäten als auch die zukünftige Kostenentwicklung sind derzeit schwer abschätzbar. Hinzu kommt, dass diese Systeme im Wettbewerb mit etablierten, technisch weniger aufwendigen Lösungen stehen, die zwar eine geringere Wirtschaftlichkeit aufweisen, dafür aber einfacher zu betreiben und am Markt zu platzieren sind.

## POTENZIELLE WASSERSTOFFPRODUKTION IN THÜRINGEN BIS 2045

Von den insgesamt 556 Kläranlagen in Thüringen wären nach aktuellem Stand lediglich **vier Anlagen** – Kühnhausen, Gotha, Gera und Jena – unmittelbar von der **Einführung einer vierten Reinigungsstufe** betroffen. Diese Anlagen behandeln rund 19 % des gesamten Thüringer Abwasseraufkommens und haben damit einen überdurchschnittlich großen Einfluss auf die Abwasserqualität im Land. Würden diese Kläranlagen eine **Sektorenkopplung** umsetzen und im Rahmen der Ozonierung Wasserstoff erzeugen, könnten – je nach Verschmutzungsgrad des Abwassers und eingesetzter Ozonmenge – zwischen **70 und 264 Tonnen Wasserstoff pro Jahr produziert** werden. Bezieht man zusätzlich die vier nächstgrößeren Kläranlagen ein, würde das potenzielle Produktionsvolumen bereits 147 bis 556 Tonnen Wasserstoff jährlich erreichen. Bei einer flächendeckenden Umsetzung der vierten Reinigungsstufe in Thüringen läge das theoretische Gesamterzeugungspotenzial entsprechend noch deutlich höher, nämlich zwischen 368 und 1.389 t Wasserstoff.

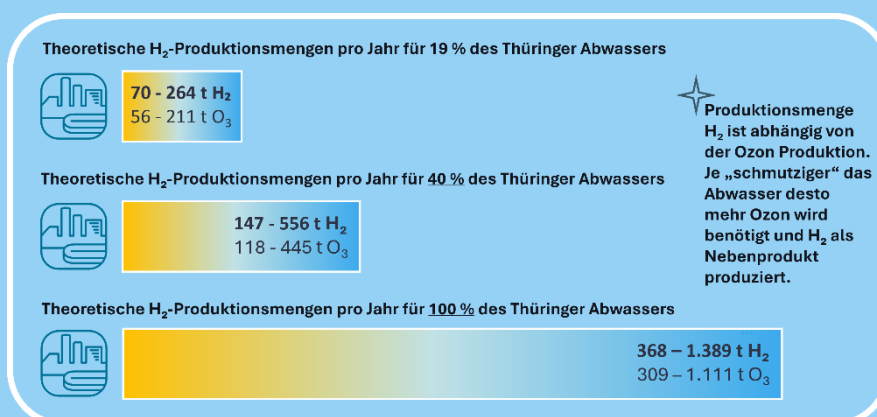



Abbildung 8: Potenzial der H<sub>2</sub>-Produktion an Thüringer Kläranlagen. Grafik: SolarInput e.V. 2025.

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Einführung der vierten Reinigungsstufe ist beschlossen und wird definitiv umgesetzt. Welche Kläranlagen letztendlich davon betroffen sein werden, bleibt jedoch abzuwarten. Durch die Nutzung des Verfahrens der Sektorenkopplung eröffnet sich jedoch die Möglichkeit, die Anlagen in den Aufbau einer dezentralen Wasserstoffinfrastruktur einzubinden. Dadurch ergeben sich Chancen, die Abwasserreinigung wirtschaftlicher zu gestalten und gleichzeitig einen wertvollen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

### Politische & regulatorische Maßnahmen

- 
- Übersetzung der KARL-Richtlinie auf Bundes- und Landesebene.
  - Rechtssicherheit schaffen für die Produktion von H<sub>2</sub> an Kläranlagen.
  - Anpassung der Abgaben- und Kostenstruktur von Kläranlagen bei wirtschaftlicher H<sub>2</sub>-Produktion
  - Fortbildung und Ausgestaltung der Fachpersonalstruktur.
  - Roadmap zur Umsetzung der vierten Reinigungsstufe in kommunalen Klärwerken.
  - Regelung der Kostenübernahme durch Verursacher (Hersteller von Kosmetika, Medizin etc.)

### Finanzielle Anreize & Förderprogramme

- Finanzielle Förderung von Early Adoptern der H<sub>2</sub>-Technologie.
- Neben CAPEX auch OPEX-Förderprogramme für Betriebskosten und H<sub>2</sub>-Transport einführen.
- Industriestrompreis für die Vierte Reinigungsstufe.

### Infrastruktur & Technik

- Ermittlung geeigneter Kläranlagen (ab 10.000 EW mit erhöhten Spurenstoffmengen).
- Bauzeiten und Genehmigungen für H<sub>2</sub>-Infrastruktur beschleunigen.

### Wissen & Umsetzung

- Ausbildungs- und Fortbildungsprogramme für das Personal von Kläranlagen.
- Befähigung von Personal, zur Bewertung von H<sub>2</sub>-Technologien, in Genehmigungsbehörden und Fachämtern.
- Öffentlichkeitsarbeit zur Sektorenkopplung an Kläranlagen.
- Rebranding von Kläranlagen als Produktionsstandort.





## 4 | Sektorenübergreifende Handlungsempfehlungen

Autor: Fabian Pflügler, Anna Mehlis, Stephan Humbert, Phillip-Simon Keitel

Das Mehrebenenmodell in Abbildung 9, das in Kapitel 2 genauer erläutert wurde, zeigt die zentralen Konfliktachsen beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Die Form der umgekehrten Pyramide verdeutlicht: **Der größte Druck lastet auf der regionalen Ebene.** Hier müssen Unternehmen alle Vorgaben von übergeordneten Ebenen umsetzen während gleichzeitig deutlich wird, wie sehr der regionale Wasserstoffhochlauf **von politischen Entscheidungen** der darüberliegenden Ebenen **abhängig ist**. Folgende globale Trends und Entwicklungen haben daher entscheidenden Einfluss auf die regionale Ebene und damit auch auf den Wasserstoffmarkthochlauf in Thüringen.

### Geopolitische Konfliktachse: Energiesouveränität durch Wasserstoff

Kriege und Handelskonflikte wirken direkt auf die regionale Wasserstoffwirtschaft. Bereits die Ankündigung des **EU-USA-Zolldeals** im Juli 2025 hat zu erheblicher **Verunsicherung in der Wasserstoffbranche geführt**. Das Abkommen, das von EU-Parlament und den Mitgliedsstaaten noch ratifiziert werden muss, sieht vor, dass die EU bis zum Ende der Amtszeit Donald Trumps im Januar 2029 US-Energieprodukte im Wert von **750 Milliarden US-Dollar** importiert – darunter Flüssigerdgas (LNG) und Erdöl [19]. Dieses Volumen übersteigt den bisherigen Bedarf deutlich: 2024 importierte die EU fossile Energierohstoffe im Gesamtwert von etwa 376 Mrd.€ – davon nur rund 65 Milliarden aus den USA. Das neue Abkommen sieht hingegen durchschnittlich über 210 Mrd.€ pro Jahr aus den USA vor – **fast eine Verdreifachung der bisherigen US-Importe** [20]. Die massiven Importe an billigem US-Erdgas verunsichern die Wasserstoffbranche in Deutschland erheblich, da Wasserstoff insbesondere in den Bereichen Industrie und Energie in **direkter Konkurrenz zu Erdgas** steht. Bei den angekündigten hohen Importmengen ist davon auszugehen, dass Erdgas in absehbarer Zeit **günstig bleiben** wird, was den wirtschaftlichen Anreiz für eine Umstellung auf Wasserstoff deutlich verringert.

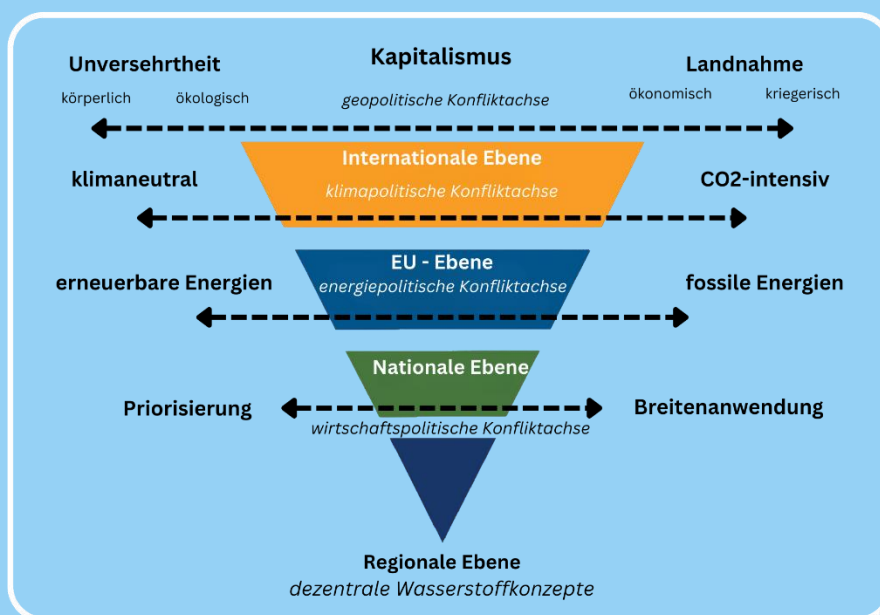


Abbildung 9: Konfliktachsen dezentraler Wasserstoffkonzepte im Mehrebenenmodell. Grafik: Fabian Pflügler 2025.



Dabei stellt sich gleichzeitig die grundsätzliche Frage der Versorgungssicherheit: Das Abkommen führt zu einer **massiven Abhängigkeit** von einem einzigen widersprüchlichen und oft unglaublichen Handelspartner. Dies **widerspricht** dem nach der russischen Invasion in der Ukraine erklärten **Ziel der Diversifizierung**. Die Energiekrise zu Beginn des Ukrainekrieges hat gezeigt, welche unkalkulierbaren Preissteigerungen aus solchen Abhängigkeiten resultieren können. Eine preisstabile **nationale Versorgung** mit erneuerbaren Energien würde diese strukturellen Risiken vermeiden und den regionalen Markthochlauf von grünem Wasserstoff ermöglichen.

#### Internationale Ebene: Ohne die USA funktioniert es nicht



Der fossile Rückschritt in den USA und ihr Fernbleiben bei der letzten **Weltklimakonferenz** der Vereinten Nationen (COP30) erschweren den globalen Klimaschutz massiv. Die USA sind sowohl bei Öl als auch bei Gas der **weltweit größte Produzent** und fördern über ein Fünftel des globalen Erdöls sowie fast ein Viertel des globalen Erdgases [21][22]. Ohne die USA als größten Produzenten fossiler Energien kann ein globaler Ausstieg nicht gelingen, der unbedingt notwendig ist, um den Markthochlauf von grünem Wasserstoff zu ermöglichen. Nur durch eine **Ver-**

**knappung der fossilen Brennstoffe** kann grüner Wasserstoff schnell wettbewerbsfähig werden. Vor dem Hintergrund der Endlichkeit fossiler Ressourcen ist eine Defossilisierung aller Wirtschafts- und Lebensbereiche ohnehin langfristig unausweichlich.

#### Supranationale Ebene: Konservative und Rechte Parteien gefährden H<sub>2</sub>-Markthochlauf

Die von der Europäischen Union im Dezember 2025 beschlossene Abschwächung des **Lieferkettengesetzes** markiert einen **Paradigmenwechsel in der europäischen Gesetzgebung**. Erstmals konnte eine Koalition aus konservativen und rechten Kräften ein zentrales Nachhaltigkeitsgesetz des **Green Deal** deutlich abschwächen [23]. Die Abschwächung ist unmittelbar der geopolitischen Konfliktachse verknüpft. **USA und Katar drohten im Oktober 2025**, ihre LNG-Exporte in die EU einzustellen, falls die Sorgfaltspflichten des Lieferkettengesetzes beibehalten würden [24].



Dieser Präzedenzfall zeigt exemplarisch, wie der **Druck fossiler Großkonzerne** (und daraus resultierend deren Länder) klimapolitische Errungenschaften zurückdrängen, wenn sie auf Zustimmung von konservativen und rechten Parteien in Europa stoßen. Um grünen Wasserstoff nachhaltig wettbewerbsfähig zu machen, bedarf es jedoch massiver **langfristiger und verlässlicher Unterstützung auf EU-Ebene** und eines politischen Willens, die Klimaneutralität und dabei auch die **Energiesouveränität zu erreichen**.

#### Nationale Ebene: Soziale Gerechtigkeit entscheidet über Akzeptanz

Die ökologische Transformation kann nur mit den **Beschäftigten** unterer sozialer Klassen gelingen – insbesondere in Betrieben mit fossilem Geschäftsmodell. Ohne ökonomischen Wohlstandsgewinn verliert sie gesellschaftlichen Rückhalt, was rechten Parteien Auftrieb gibt, die Klimaschutz grundsätzlich ablehnen. Fehlt die **soziale Verankerung**, wird der ökologische Umbau als Bedrohung wahrgenommen und verliert demokratische Legitimation. **Politische Entscheidungsträger:innen** müssen dies berücksichtigen, um das Vertrauen breiter Bevölkerungsschichten nicht zu verlieren. Ansonsten gerät die regionale grüne Wasserstoffwirtschaft weiter unter Druck, wenn rechte Parteien die inkohärenten politischen Richtungsentscheidungen im Zuge der Transformation zur **Leugnung des Klimawandels** und Delegitimation der Energiewende instrumentalisieren können.



## Regionale Ebene: Militärische Verwendung verschärft Nutzungskonkurrenz

Die Produktion von grünem Wasserstoff für militärische Zwecke ist nicht nachhaltig und verschärft die Nutzungskonkurrenz um ein ohnehin **knappes Produkt**. Grüner Wasserstoff sollte ausschließlich für zivile und friedliche Zwecke eingesetzt werden: für die Transformation der Industrie, die Nutzung im ÖPNV oder in der Abwasserreinigung. Nicht für Rüstung und Krieg, die **Natur zerstören** und Menschenleben vernichten – und damit genau jene **Lebensgrundlagen** zugrunde richten, die durch den regionalen Markthochlauf von grünem Wasserstoff geschützt werden sollten.



Aus der Betrachtung globaler, nationaler und regionaler Entwicklungen ergeben sich Handlungsempfehlungen für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft in Deutschland und Thüringen:

### Strategische Rahmenbedingungen

- Landesweite **H<sub>2</sub>-Strategie aktualisieren** und als verbindliches Arbeitsinstrument ausgestalten
- Regionale **Förderprogramme für grünen Wasserstoff** weiterentwickeln (bspw. Pfadabhängigkeit berücksichtigen im öffentlichen Nahverkehr)
- **Grüne Leitmärkte schaffen** für die Nutzung von grünem Wasserstoff (z. B. ÖPNV, Schwerverkehr, Industrie)
- Klare **Vorgaben für die** Verwendung von regional und grün produzierten Gütern in der **öffentlichen Beschaffung** etablieren und damit die regionale Wirtschaft stützen (z.B. Baugewerbe, Stahlindustrie, etc.)
- **Wasserstoffeinsatz von Fall-zu-Fall prüfen** (sinnvoller Einsatz hängt vom Einzelfall ab)

### Markt & Wirtschaft

- Marktmechanismen zur **Etablierung eines konkurrenzfähigen Wasserstoffpreises** auf regionaler Ebene etablieren
  - **Differenzkostenförderung** auf regionaler Ebene im Auktionsmechanismus
  - **Regionaler Zwischenhändler** schließt Verträge sowohl mit Anbietern als auch Abnehmern (H2Global als Vorbild)
  - Unterschied zwischen Einkaufspreis und Verkaufspreis wird durch staatliche Gelder ausgeglichen
- **Netzentgelte für Elektrolyseure senken**, Industriestrompreis auf Produzenten von grünem Wasserstoff ausweiten
- **Regionale Akteure** im gesamten Prozess von Planung bis Fertigstellung der Anlage umfassend unterstützen (**ThEGA als Servicestelle** weiter ausbauen)
- Staatliche Unterstützung an öffentliche Beteiligungsmöglichkeiten sowie ökologische und regionale Kriterien koppeln
- Vereinfachte **steuerrechtliche Einordnung** und Erleichterung für grünen Wasserstoff

## Regulierung, Standardisierung, Genehmigung

- **EU-weit harmonisierte Standards** für Elektrolyseure, H<sub>2</sub>-Tankstellen, Speicher und Drucksysteme entwickeln
- **Genehmigungsverfahren** für H<sub>2</sub>-Projekte massiv **beschleunigen**
- **Koordination zwischen Behörden verbessern** (Bürokratieabbau, vereinfachte digitale Prozesse, ...)
- **Netzdienliche Elektrolyse ermöglichen** und Potenzial für den Umgang mit Dunkelflauten nutzen (grüner Wasserstoff speichert grüne Energie für den Winter)

## Wissen & Kompetenz

- Regionale **Netzwerkstrukturen und Wissensaustausch** stärken
  - Thüringer Allianz für Wasserstoff in der Industrie (ThAWI) als Multiplikator
  - ThAWI kann Unternehmen Wissen, Kompetenz und Unterstützung bieten
- Technologievorsprung bei Elektrolyseuren ausbauen und **industrielle Serienfertigung** durch stärkere Verzahnung von Industrie, Forschung und Praxis **vorantreiben**
- **Schulungsprogramme für Fachkräfte** entlang der gesamten Wertschöpfungskette schaffen
- Weiterbildungsmöglichkeiten für **Personal in Genehmigungsbehörden** ausbauen

## Einbindung der Zivilgesellschaft

- Niedrigschwellige **Informations- und Dialogangebote** schaffen bzw. etablierte Formate nutzen (z. B. regionale Veranstaltungen wie die „**WOCHE DES WASSERSTOFFS**“ **aktiv landesweit unterstützen** und koordinieren z. B. durch die ThAWI)
- Zivilgesellschaftliche **Teilhabe an regionaler Wertschöpfung und Entscheidungen stärken** (Energiegenossenschaften als Musterbeispiel)
- **Lokale Initiativen**, Vereine und Umweltgruppen von Beginn an in Vorhaben **einbinden** (Bsp.: Bau von Elektrolyseuren, Windkraftanlagen, etc.)
- **Förderprogramme für gesellschaftliches Engagement** für Klima- und Umweltschutz erhalten und ausbauen



Insgesamt ergeben sich für Thüringen wertvolle Mehrwerte einer regionalen Wasserstoffwirtschaft:



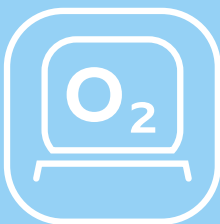
- Von grünen Wasserstoffkonzepten **profitiert die regionale Wirtschaft und Industrie mittel- und langfristig** (produktions- und anwenderseitig)



- Regionale Wasserstoffkonzepte sind ein **zentraler Schlüssel zur Erreichung von Klimaneutralitätszielen**



- Regionale Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff kann einen entscheidenden Beitrag zur **Versorgungssicherheit und Netzstabilität** liefern



- Durch regionale Produktion können sich **wertvolle Sektorenkopplungseffekte** entfalten, die über die Dekarbonisierung hinausgehen z.B. **O<sub>2</sub>-Nutzung, grüne Kohlenstoffproduktion, etc.**



- Bei hohen H<sub>2</sub>-Mengen ist der **Import von grünem Wasserstoff wichtig** und sinnvoll für die regionale Wirtschaft. Der Anschluss an das H<sub>2</sub>-Kernnetz ist hierbei ein großer Standortvorteil (Bsp.: Stahlwerk Thüringen)

# Abkürzungsverzeichnis

<b>BEV</b>	engl. Battery-Electric Vehicle; dt. Batterieelektrisches Fahrzeug
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BImSchV</b>	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
<b>BZ</b>	Brennstoffzelle
<b>CAPEX</b>	engl. capital expenditures; dt. Investitionsausgaben
<b>CBAM</b>	engl. Carbon Border Adjustment Mechanism; dt. CO <sub>2</sub> -Grenzausgleichsmechanismus: Instrument der EU, das für bestimmte energieintensive Importprodukte einen CO <sub>2</sub> -Preis erhebt, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zwischen in der EU produzierten und importierten Gütern zu schaffen
<b>CCfD</b>	engl. Carbon Contract for Difference; dt. Klimaschutzdifferenzvertrag: staatlicher Vertrag mit Unternehmen, der einen festen CO <sub>2</sub> -Preis garantiert und so die Mehrkosten klimafreundlicher Produktionsverfahren gegenüber der konventionellen Technik ausgleicht
<b>C</b>	Elementsymbol für Kohlenstoff
<b>CCS</b>	engl. Carbon Capture and Storage; dt. Kohlenstoffabscheidung und -speicherung
<b>CCU</b>	engl. Carbon Capture and Utilization; dt. Kohlenstoffabscheidung und-nutzung
<b>CH<sub>4</sub></b>	Summenformel für Methan, Hauptbestandteil von Erdgas
<b>CO<sub>2</sub></b>	Summenformel für Kohlenstoffdioxid o.a. Kohlendioxid
<b>COP</b>	engl. Climate Conference of the Parties; dt. Klimakonferenz der Vereinten Nationen (UN)
<b>DRI</b>	engl. Direct Reduced Iron; dt. Direkt reduziertes Eisen; auch Direktreduktionstechnologie
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EW</b>	Einwohnerwerte
<b>FCEV</b>	engl. Fuel-Cell-Electric-Vehicle; dt. Brennstoffzellenfahrzeug
<b>H<sub>2</sub></b>	Summenformel für Wasserstoff
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Summenformel für Wasser
<b>KARL</b>	EU-Kommunalabwasserrichtlinie (Richtlinie (EU) 2024/3019)
<b>LNG</b>	engl. Liquefied Natural Gas; dt. Flüssigerdgas: durch starke Abkühlung auf etwa -162 °C verflüssigtes Erdgas mit stark reduziertem Volumen, das vor allem für den weltweiten Transport von Erdgas auf dem Seeweg eingesetzt wird
<b>NRW</b>	Nordrhein-Westfalen (deutsches Bundesland)
<b>O<sub>2</sub></b>	Summenformel für Sauerstoff
<b>OPEX</b>	engl. operational expenditures; dt. Betriebsausgaben, Betriebskosten
<b>ÖPNV</b>	Öffentlicher Personennahverkehr
<b>PEM</b>	engl. Proton-Exchange-Membrane oder Polymer-Elektrolyt-Membrane; dt. Protonen-Austausch-Membran oder Polymer-Elektrolyt-Membran – hier verwendet für die PEM-Elektrolyse-Technologie
<b>PtX</b>	engl. Power-to-X; dt. Strom-zu-X wobei X symbolisch für andere Energieträger z.B. in Form von Wärme, Flüssigkeiten oder Gasen steht
<b>RFNBO</b>	engl. Renewable Fuels of Non-Biological Origin; dt. Erneuerbare Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs: synthetischer, flüssiger oder gasförmiger Kraftstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, z. B. grüner Wasserstoff oder Wasserstoffderivate
<b>RED III</b>	engl. Renewable Energy Directive; dt. Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU)
<b>RIS</b>	Regionale-Innovationsstrategie des Freistaats Thüringen
<b>ThAWI</b>	Thüringer Allianz für Wasserstoff in der Industrie; Netzwerk der Thüringer Wasserstoffwirtschaft geleitet durch die ThEGA
<b>ThEGA</b>	Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur; landeseigene Energieagentur des Freistaats Thüringen, die Kommunen, Unternehmen und weitere Akteure zu Energieeffizienz, erneuerbaren Energien und Klimaschutz berät, Projekte koordiniert und Netzwerkarbeit leistet
<b>Tkm</b>	Tonnenkilometer (Einheit für die Verkehrsleistung)
<b>TMUENF</b>	Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie, Naturschutz und Forsten
<b>TRL</b>	Engl. Technology Readiness Level; dt. Technologiereifegrad (1-9, wobei 9 das Maximum ist)
<b>TWh</b>	Terawattstunde; Maßeinheit für die Energiemenge (1 TWh entspricht ca. dem jährlichen Strombedarf von rund 250.000 durchschnittlichen Haushalten)

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herstellungsvarianten von Wasserstoff. Inhaltliche Quellen [3, 4], Illustration [4]. Grafik: Hilde Teichmann 2025.	4
Abbildung 2: Konfliktachsen dezentraler Wasserstoffkonzepte im Mehrebenenmodell. Grafik: Fabian Pflügler 2025.	5
Abbildung 3: Gesetze, Richtlinien und Subventionen zur grünen Stahlproduktion im Mehrebenenmodell. Graphik: Fabian Pflügler 2025.	7
Abbildung 4: Bedarfsentwicklung für die Nutzung von Wasserstoff zur grünen Stahlherstellung durch Direktreduktion [11]	8
Abbildung 5: Prozess zur Erzeugung des "Grünen Kalk", Grafik HySON Institut und Bauhaus-Universität Weimar.	12
Abbildung 6: CO <sub>2</sub> -Einsparungspotenzial durch Methanisierung am Standort Deuna. Eigene Berechnung auf Grundlage von Expert:inneninterviews und Angaben des Thüringer Landesamtes für Statistik. Grafik SolarInput e.V. 2025.	13
Abbildung 7: Anteil auf grünem Gas basierenden Anlagen zur Fernwärmeerzeugung bis 2040. Grafik: SolarInput e.V. 2025.	17
Abbildung 8: Potenzial der H <sub>2</sub> -Produktion an Thüringer Klärwerken. Grafik: SolarInput e.V. 2025.	19
Abbildung 9: Konfliktachsen dezentraler Wasserstoffkonzepte im Mehrebenenmodell. Grafik: Fabian Pflügler 2025.	21

# Quellen

- [1] **Brüggemann, Anke (2024)**: Hochlauf der grünen Wasserstoffwirtschaft – wo steht Deutschland? KfW Research Nr. 475. Online verfügbar unter: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2024/Fokus-Nr.-475-November-2024-Wasserstoff.pdf#:~:text=Im%20vergangenen%20Jahr%20wurden%20rund%2042%20TWh,wurde%20durch%20die%20Elektrolyse%20von%20Wasser%20hergestellt>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [2] **Deutsche Energie-Agentur (2025)**: Elektrolysekapazitäten in Deutschland Stand und Ausblick, Stand Oktober 2025. Online verfügbar unter: <https://www.dena.de/DATEN3090>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [3] **HySON Institut (2022)**: H2Facts – Teil 1, Wasserstofferzeugungsarten und Nebenprodukte. Online verfügbar unter: <https://www.h2well.de/neuigkeiten-leseansicht/h2facts-teil-1.html>. Zuletzt aufgerufen am: 22.12.2025.
- [4] **Wurbs, Sven/ Stöcker, Philipp/ Gierds, Jörn/ Stemmler, Christoph/ Fishedick, Manfred/ Henning, Hans-Martin/ Matthies, Ellen/ Pittel, Karen/Renn, Jürgen/ Sauer, Dirk Uwe/ Spiecker genannt Döhmman, Indra (2024)**: Wasserstoff – Welche Bedeutung hat er im Energiesystem der Zukunft? (Kurz erklärt!). Online Verfügbar unter: [https://doi.org/10.48669/esys\\_2024-1](https://doi.org/10.48669/esys_2024-1). Zuletzt aufgerufen am: 22.12.2025.
- [5] **DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum (2023)**: Wasserstoff aus Biomasse. DBFZ Report Nr. 46. Leipzig. Online verfügbar unter: [https://www.dbfz.de/fileadmin/user\\_upload/Referenzen/DBFZ\\_Reports/DBFZ\\_Report\\_46.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_46.pdf). Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [6] **H2-news.de (2025)**: Rheinmetall plant europaweites Netzwerk für synthetische Kraftstoffe. Artikel vom 9. Dezember 2025. Online verfügbar unter: <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/rheinmetall-plant-europaweites-netzwerk-fuer-synthetische-kraftstoffe/>. Zuletzt aufgerufen am: 10.12.2025.
- [7] **IHK Braunschweig (2025)**: Grüner Wasserstoff: Studie sieht wettbewerbsfähigen Preispfad bis 2030. Artikel vom 2. September 2025. Braunschweig. Online verfügbar unter: <https://www.ihk.de/braunschweig/beratung-und-service/umwelt-und-energie/energie/wasserstoff/studie-wettbewerbsfaehigkeit-gruener-wasserstoff-5054004>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [8] **Wirtschaftsvereinigung Stahl (2025)**: Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland – Ausgabe 2025. Berlin: Wirtschaftsvereinigung Stahl. Online verfügbar unter: <https://www.wvstahl.de/publikationen/daten-und-fakten-zur-stahlindustrie-in-deutschland-ausgabe-2025/>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [9] **WV Stahl (2025)**: Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2025. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Online verfügbar unter: [https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/20250429\\_Statistisches-Jahresbuch\\_final.pdf](https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/20250429_Statistisches-Jahresbuch_final.pdf). Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [10] **Nationaler Wasserstoffrat (2024)**: Wasserstoffbedarfe der Transformationen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland. Online verfügbar unter: [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2024/2024-05-03\\_NWR-Grundlagenpapier\\_Update\\_2024\\_Wasserstoffbedarfe.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2024/2024-05-03_NWR-Grundlagenpapier_Update_2024_Wasserstoffbedarfe.pdf). Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [11] **Albrecht, Uwe/Ball, Michael/Bünger, Ulrich/Kutz, Christopher/Michalski, Jan (2022)**: Emissionsfreie Stahlerzeugung – Metastudie zu den technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parametern für die Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn. Im Auftrag des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbands (DWV). Online verfügbar unter: [https://lbt.de/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-30-HySteel-LBST\\_Emissionsfreie\\_Stahlerzeugung.pdf](https://lbt.de/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-30-HySteel-LBST_Emissionsfreie_Stahlerzeugung.pdf). Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [12] **EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (2021)**: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität 2045. Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Hrsg. von Deutsche Energie-Agentur (dena). Verfügbar unter: [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/10/211005\\_EWI-Zusammenfassung\\_dena-Leitstudie-Aufbruch-Klimaneutralitaet.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/10/211005_EWI-Zusammenfassung_dena-Leitstudie-Aufbruch-Klimaneutralitaet.pdf). Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [13] **Kaczmarczyk, Patrick & Krebs, Tom (2025)**: Grüner Stahl als zentraler Pfeiler einer resilienten Wirtschaft. Universität Mannheim. Online verfügbar unter: [https://www.vwl.uni-mannheim.de/media/Lehrstuehle/vwl/Krebs/Grueener\\_Stahl.pdf](https://www.vwl.uni-mannheim.de/media/Lehrstuehle/vwl/Krebs/Grueener_Stahl.pdf). Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.
- [14] **Gärtner, Katja (2024)**: Dyckerhoff plant Großinvestition in CO<sub>2</sub>-Abscheideanlage. Deuna. Online verfügbar unter: <https://www.dyckerhoff.com/w/co2-abscheideanlage-im-werk-deuna>. Zuletzt aufgerufen am: 08.12.2025.



[15] **Ferngas Netzgesellschaft mbH (2025)**: Netzkarte Thüringen. Nürnberg. Online verfügbar unter: <https://www.ferngas.de/fernleitungsnetz>. Zuletzt aufgerufen am 08.12.2025

[16] **Bolduan, Rico (2024)**: Konzepte und erste Umsetzung der Wärmeversorger (Präsentation). Rudolstadt. 13.11.2024.

[17] **Morgenroth, Frank; Schmidt, Sabine; Steinmüller, Peter; Thomas, Kevin (2023)**: Leitfaden zur Evaluierung eines Einsatzes von Wasserstoff in thermischen Prozessen. Sonneberg. S.10.

[18] **Dr. Segschneider, Anja; (2025)**: EU-Kommunalabwasserrichtlinie (KARL): Strengere Regeln und mehr Herstellerverantwortung. Stuttgart. <https://www.gesundheitsindustrie-bw.de/fachbeitrag/aktuell/eu-kommunalabwasserrichtlinie-karl-strengere-regeln-und-mehr-herstellerverantwortung>. Zuletzt aufgerufen am 08.12.2025

[19] **Tagesschau (2025)**: EU-Zolldeal mit den USA: Wer soll die Energieimporte bezahlen? 05.08.2025. Online verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/eu-milliardenversprechen-100.html>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.

[20] **Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (2025)**: *Energierohstoffimporte*. EU-Einfuhrwerte von Energierohstoffen im Jahr 2024 bei 376 Mrd. €. Commodity TopNews (CdM) 04/2025. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover. URL: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/SharedDocs/Downloads/CdM/DERA%202025\\_cdm\\_04\\_Energierohstoffimporte.pdf](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/SharedDocs/Downloads/CdM/DERA%202025_cdm_04_Energierohstoffimporte.pdf) (Abruf: 22.01.2026)

[21] **Enerdata (2024)**: Globale Erdgasförderung – Weltweite Gasstatistik. Online verfügbar unter: <https://energiestatistik.enerdata.net/erdgas/welt-erdgas-produktion-statistik.html>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.

[22] **Statista (2025)**: USA fördern mehr als ein Fünftel des weltweiten Erdöls. Infografik vom 24.06.2025. <https://de.statista.com/infografik/7187/oelproduktion-der-wichtigsten-foerderlaender/>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.

[23] **Tagesschau (2025)**: EU einigt sich auf abgeschwächtes Lieferkettengesetz. 09.12.2025. Online verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/eu-lieferkettengesetz-118.html>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.

[24] **Merkur (2025)**: EU-Verordnung: USA und Katar drohen mit LNG-Stopp. 31.10.2025. Online verfügbar unter: <https://www.merkur.de/wirtschaft/katar-kuendigen-lng-stopp-an-geplante-eu-verordnung-usa-und-zr-94001694.html>. Zuletzt aufgerufen am: 19.12.2025.

# Impressum

## Grüner Wasserstoff für Industrie & Energie - Ergebnisse und Empfehlungen für Thüringen und darüber hinaus

### Autor:innen

M. A. Fabian Pflügler | [fabian.pfluegler@uni-jena.de](mailto:fabian.pfluegler@uni-jena.de)

M. A. Anna Mehlis | [anna.mehlis@uni-jena.de](mailto:anna.mehlis@uni-jena.de)

M. A. Stephan Humbert | [stephan.humbert@uni-jena.de](mailto:stephan.humbert@uni-jena.de)

M. Sc. Phillip-Simon Keitel | [p.keitel@solarinput.de](mailto:p.keitel@solarinput.de)

Aus dem Projekt h2well-Markthub gibt es einen weiteren Leitfaden:

### Grüner Wasserstoff als Schlüssel zur Dekarbonisierung im Schwerlastverkehr – - Ergebnisse und Empfehlungen für Thüringen und darüber hinaus

Beides digital verfügbar in der „H2Thek – Wasserstoff in der Region!“ unter  
<https://edih.digital/course/view.php?id=58>



### Herausgeber



SolarInput e.V.  
Gustav-Tauschek-Straße 2  
99099 Erfurt  
(Gesamtkoordination)



Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, Arbeitsbereich Arbeits-  
und Wirtschaftssoziologie  
Carl-Zeiß-Straße 3  
07743 Jena

### Veröffentlichung

Erfurt, Jena | 02/2026