

Analyse der Erzeugungspotenziale von Wasserstoff in Hessen in technischer und ökonomischer Sicht

Brennstoffzellenforum | 30. Oktober 2024

Dr. Eric Spinnräker

Ernst & Young Real Estate GmbH

Agenda

1. Überblick H₂-Studien Hessen
2. Exklusiv: Studie „Analyse von Wasserstofferzeugungspotenzialen und Identifikation geeigneter Elektrolysestandorte in Hessen“
3. Q & A

1 - Überblick H₂-Studien Hessen

Wasserstoff - Entwicklungsphasen und Meilensteine



Potenzialanalyse Wasserstoffbedarf in Hessen

Motivation

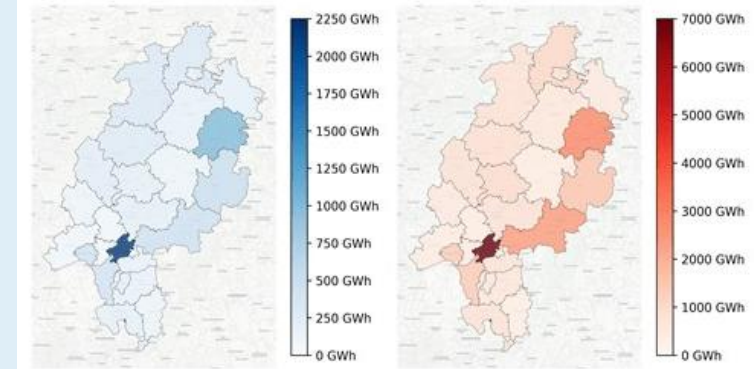
- Unterstützung und Förderungen von Entwicklung und Einsatz von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien durch das Land Hessen
- Erkenntnisgewinn über den zukünftigen, sektorspezifischen Stellenwert von Wasserstoff (für Hessen) als Baustein der Umsetzung der hessischen Wasserstoffstrategie

Methodik / Vorgehensweise

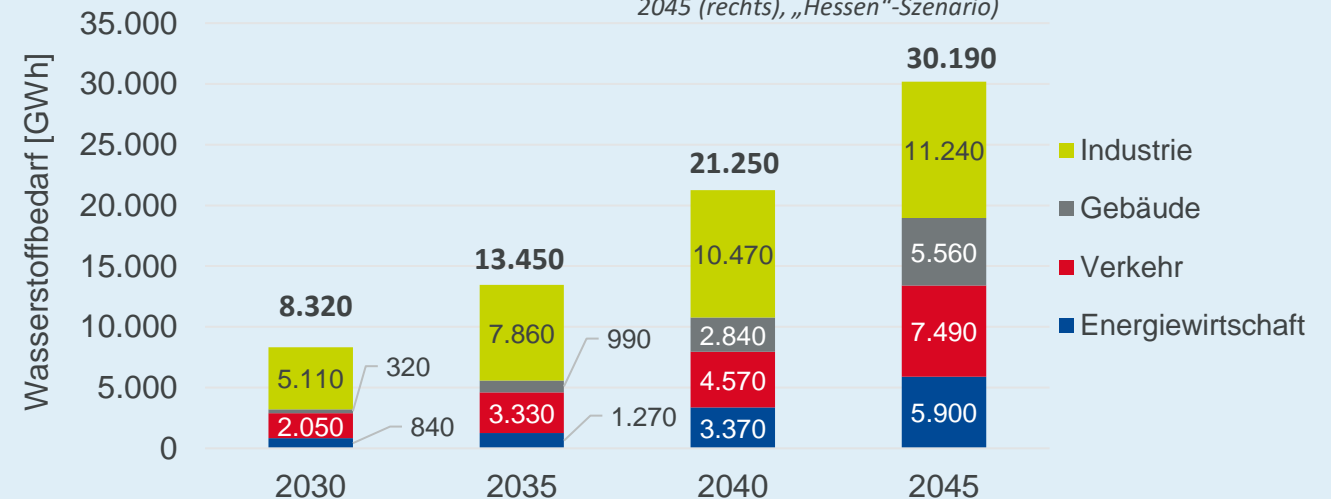
- Ermittlung des potenziellen Wasserstoffbedarfs auf Basis wissenschaftlicher Transformationsszenarien zur Erreichung der Klimaschutzziele
- Formulierung von vier Betrachtungsszenarien zur Abbildung der Spannweite und Unsicherheiten in den Prognosen
- Einbindung von Akteuren und Akteurinnen der jeweiligen Sektoren zur Plausibilisierung der Ergebnisse

Wesentliche Ergebnisse

- Unter Berücksichtigung der verschiedenen Betrachtungsszenarien ergibt sich für die Wasserstoffbedarfsprognose eine Spannweite von ca. 14,1 TWh bis ca. 54,1 TWh für das Jahr 2045
- Prognoseergebnisse im „Hessen“-Szenario:



Wasserstoffbedarf nach Landkreis in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), „Hessen“-Szenario



Langfassung: [LEA_Potenzialanalyse_lang \(hessen-agentur.de\)](https://www.hessen-agentur.de/LEA_Potenzialanalyse_lang); Kurzfassung: [LEA_Potenzialanalyse_kurz \(hessen-agentur.de\)](https://www.hessen-agentur.de/LEA_Potenzialanalyse_kurz)

Technische Machbarkeitsstudie eines regionalen Wasserstoffnetzes Rhein-Main

Motivation

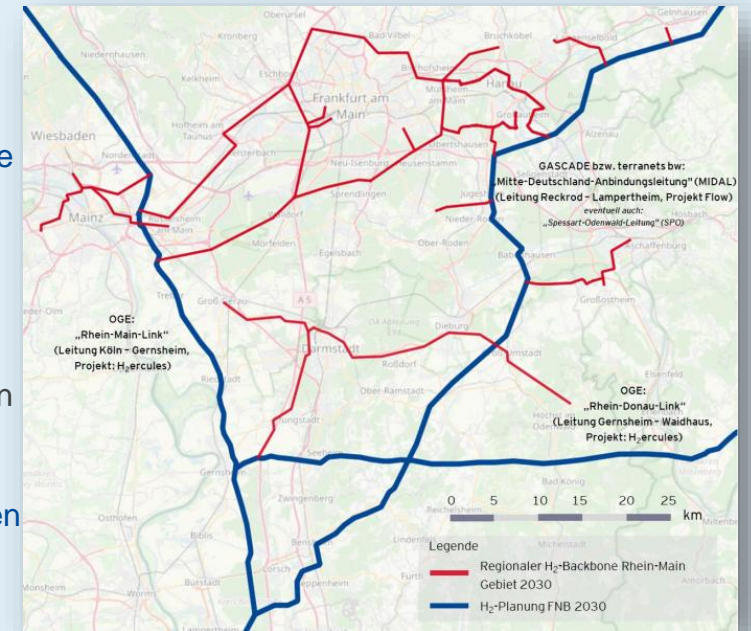
- Unterstützung und Förderung des Aufbaus einer regionalen **Wasserstoff-Infrastruktur** für die **Rhein-Main Region**
- Erkenntnisgewinn über den zukünftigen Stellenwert einer regionalen Wasserstoff-Infrastruktur in der Rhein-Main Region als **Baustein** der Umsetzung der **hessischen Wasserstoffstrategie**

Methodik / Vorgehensweise

- Workshops sowie bilaterale und multilaterale Gespräche mit **12 Projektbeteiligten VNBS**
- **Erstellung einer Netzskizze** für den regionalen Wasserstoff-Backbone basierend auf Netz- und Bedarfsdaten
- Ableitung von **Handlungsempfehlungen** basierend auf Hemmnissen und Herausforderungen aus Sicht der Projektbeteiligten VNBS

Wesentliche Ergebnisse

- **Notwendigkeit** einer regionalen Wasserstoffinfrastruktur:
 - **Ausreichende und möglichst frühzeitige Versorgung von Unternehmen** (Ankerkunden) bzw. Kraftwerken
 - **Realer Umstellungsprozess** erfordert über einen begrenzten Zeitraum **Doppelstrukturen**
 - **Vermeidung** von einzelnen ineffizienten Parallelstrukturen (kundenseitiger Leitungsbau)
- Ermittlung der **Trassierung eines regionalen Wasserstoff-Backbones** und erste überschlägige Netzdimensionierung inkl. Abschätzung der Investitionskosten
- Konkrete Handlungsempfehlungen aus Sicht der Projektbeteiligten



Regionaler Wasserstoff-Backbone Rhein-Main

~ 300 km

regionaler Wasserstoff-Backbone

~ 23 TWh

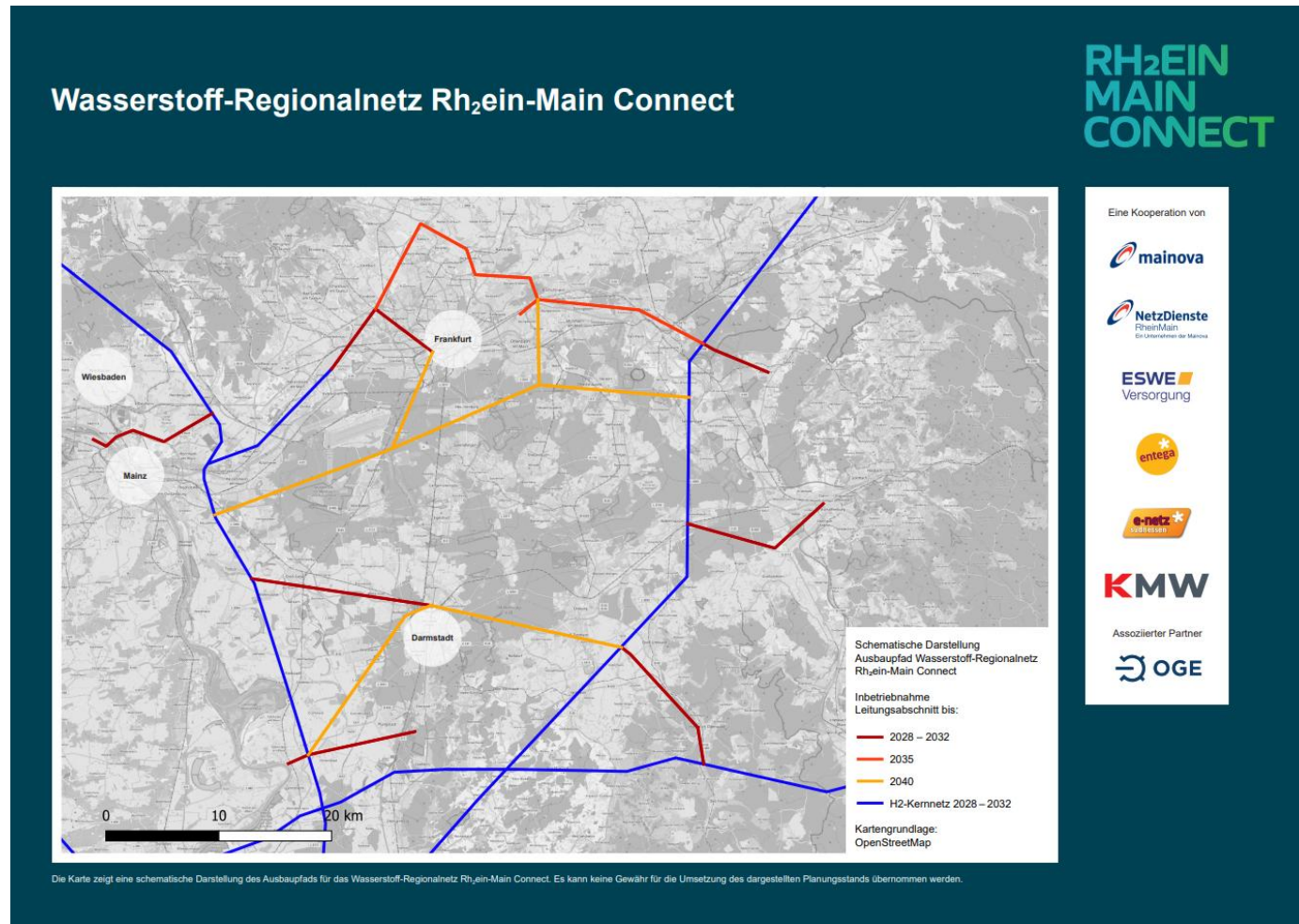
regionaler H₂-Bedarf 2045

~ 540 Mio. EUR

Investitionskosten

Schriftfassung: [HMWEVW_Wasserstoffnetz_RheinMain](#)

Exkurs: Rh2ein-Main Connect



Pressemitteilung

Energieversorgerbündnis gibt Startschuss für regionales Wasserstoff-Verteilnetz in Frankfurt/Rhein-Main

METROPOLREGION SOLL WASSERSTOFF-REGIONALNETZ RH₂EIN-MAIN CONNECT ERHALTEN



Technische Machbarkeitsstudie eines regionalen Wasserstoffnetzes in Nord- und Mittelhessen

In Bearbeitung

Motivation

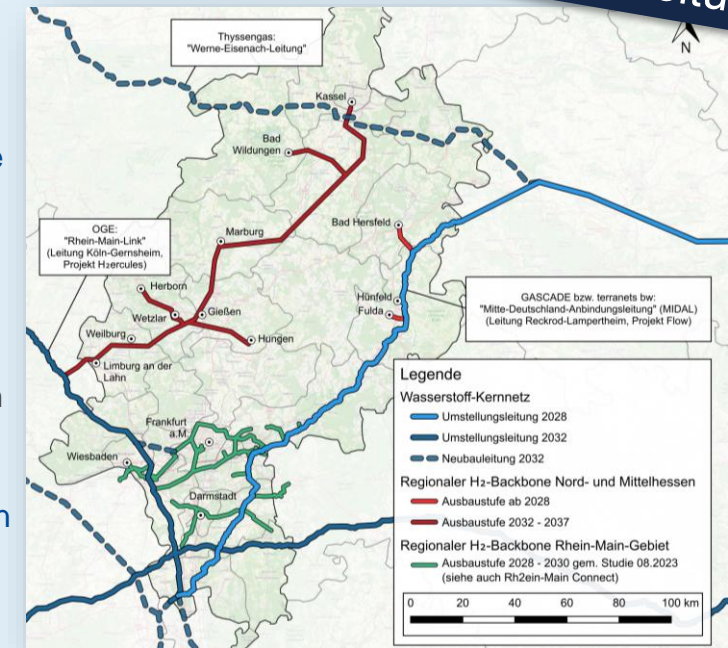
- Unterstützung und Förderung des Aufbaus einer regionalen **Wasserstoff-Infrastruktur** für die **Region Nord- und Mittelhessen**
- Erkenntnisgewinn über den zukünftigen Stellenwert einer regionalen Wasserstoff-Infrastruktur in der Region Nord- und Mittelhessen als **Baustein** der Umsetzung der **hessischen Wasserstoffstrategie**

Methodik / Vorgehensweise

- Workshops sowie bilaterale und multilaterale Gespräche mit **15 Projektbeteiligten VNB** sowie **4 FNB**
- **Erstellung einer Netzskizze** für den regionalen Wasserstoff-Backbone basierend auf Netz- und Bedarfsdaten
- Ableitung von **Handlungsempfehlungen** basierend auf Hemmnissen und Herausforderungen aus Sicht der Projektbeteiligten VNB und FNB

Wesentliche Ergebnisse

- **Notwendigkeit** einer regionalen Wasserstoffinfrastruktur:
 - Ausreichende und möglichst **frühzeitige Versorgung von Unternehmen** (Ankerkunden) bzw. Kraftwerken
 - **Realer Umstellungsprozess** erfordert über einen begrenzten Zeitraum **Doppelstrukturen**
 - Vermeidung von einzelnen ineffizienten Parallelstrukturen (kundenseitiger Leitungsbau)
- Ermittlung der **Trassierung eines regionalen Wasserstoff-Backbones** und erste überschlägige Netzdimensionierung inkl. Abschätzung der Investitionskosten
- Konkrete Handlungsempfehlungen aus Sicht der Projektbeteiligten



Regionaler Wasserstoff-Backbone Nord- und Mittelhessen

~ 280 km

regionaler Wasserstoff-Backbone

~ 8,5 - 9 TWh

regionaler H₂-Bedarf 2033 – 2037

~ 245 – 300 Mio. EUR

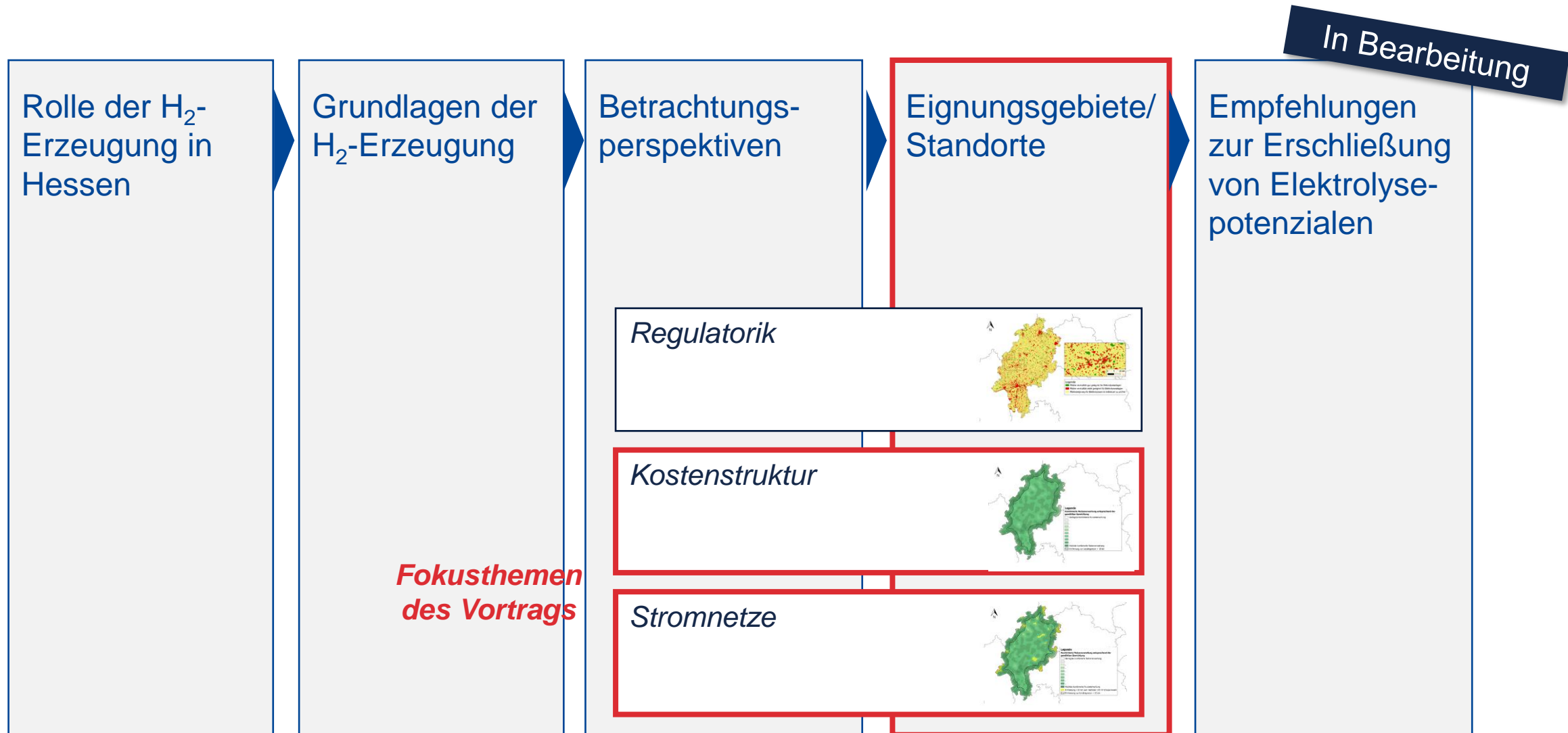
Investitionskosten

Schriftfassung: [HMWEVW_Wasserstoffnetz_RheinMain](#)

2 - Exklusiv: “Analyse von Wasserstoffherzeugungspotenzialen und Identifikation geeigneter Elektrolysestandorte in Hessen“

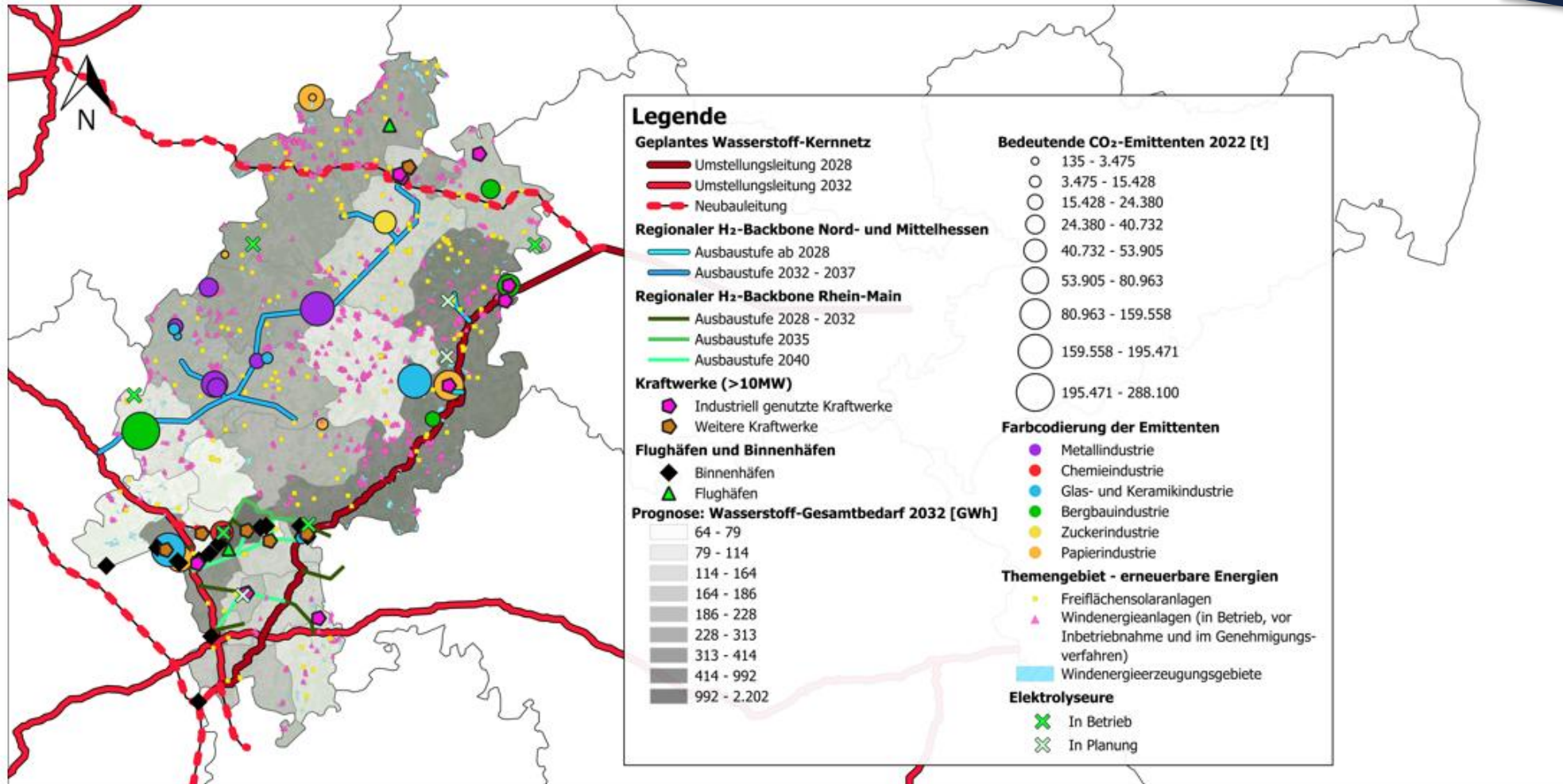
Die inhaltliche Bearbeitung dieser Studie ist noch nicht abgeschlossen.

Inhalte der Studie in der Übersicht



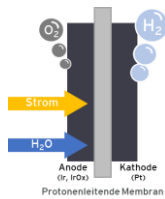
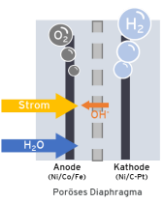
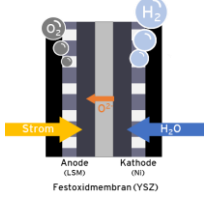
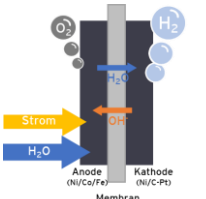
Kurzübersicht: H₂-Infrastruktur und die Rolle der dezentralen Wasserstofferzeugung

In Bearbeitung



Kurzübersicht: Elektrolyseverfahren

In Bearbeitung

	Alkali-Elektrolyse (AEL)	PEM-Elektrolyse (PEMEL)	Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL)	Anionen-Exchange-Membran-Elektrolyse (AEMEL)
Elektrolyt	20 - 40 % KOH	Polymermembran	Keramik	1 % KOH
TRL*	9	9	7	6
Felderfahrung	Ja	Ja	Teilweise	Teilweise
Temperaturniveau	70 - 90 °C	60 - 90 °C	600 - 800 °C	50 - 60 °C
Wirkungsgrad**	63 - 70 %	57 - 70 %	60 - 90 %	55 - 75 %
Kombination mit erneuerbaren Energien ***	Abhängig vom Maß der Lastwechselgeschwindigkeit	Ja	Abfall des Wirkungsgrades bei ca. 40% der Kapazität	Ja
Lebensdauer Stack	< 90.000 h	< 60.000 h	> 20.000 h	> 35.000 h
Kostenindikator ****	1.000 - 1.200 €/kW	1.500 - 2.300 €/kW	1.300 - 3.500 €/kW	900 - 1.100 €/kW
Größenordnung	> 10 MW _{el}	1 kW _{el} - 10 MW _{el}	ca. 2,6 MW _{el}	2,4 kW _{el} - 1 MW _{el}
Herausforderungen großflächige Marktanwendung	Verfügbarkeit von Ausgangsmaterialien könnte Produktionskapazitäten einschränken	Geringe Verfügbarkeit von Edelmetallen (z.B. Iridium)	Abhängig von großen Prozesswärmemengen	Neue Technologie, dadurch wenige erfahrene Anbieter
Aufbau				

* Technologie-Reifegrad (1-9)

** Wirkungsgrad: In diesem Fall der Stackwirkungsgrad bezogen auf den oberen Heizwert von Wasserstoff

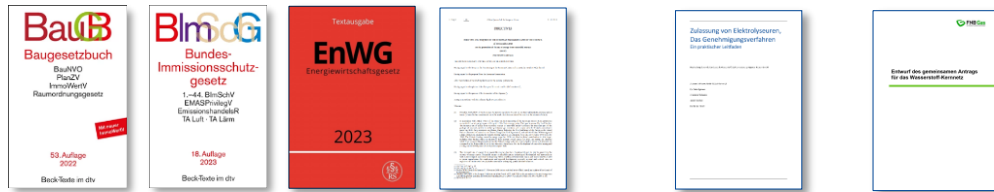
*** Kombination mit erneuerbaren Energien: schnelle Reaktionszeit bei Elektrolyse erforderlich

**** Kostenindikator: Bezogen auf den europäischen Markt

Kurzübersicht: Rechtliche Aspekte

In Bearbeitung

Rechtliche Grundlagen und Strategien/Broschüren/Leitlinien



Wesentliche Erkenntnisse

Zusammenspiel der gesetzlichen Vorgaben ergibt Machbarkeitsrahmen für potenzielle Elektrolyseur-Standorte:

- Privilegierung bspw. durch: Funktionszusammenhang, z.B. mit Windenergie- und Solaranlagen
- Verbot bspw. in Gebieten, die vornehmlich dem Wohnen dienen. Elektrolyseur muss sich nach Art und Maß in die Umgebung einfügen; darf in dem jeweiligen Gebiet nicht „aus dem Rahmen fallen“

→ **Das Aufstellen von Bebauungsplänen ist der rechtssicherste Weg Baurecht für Elektrolyseure zu schaffen!**

Neuste Entwicklungen

Wasserstoffbeschleunigungsgesetz

- Regelung von **verfahrensrechtlichen Aspekten** (bspw. Öffentlichkeitsbeteiligung, Verfahrensdauer, elektronische Übermittlung von Dokumenten, etc.)
- Generell **keine inhaltlichen Erweiterungen** bestehender gesetzlicher **materiell-rechtlicher Bestimmungen**
- Einstufung von **H₂-Vorhaben als im überragenden öffentlichen Interesse** stehend

Änderung der 4. BImSchV

- **Regelungen über die Genehmigungsbedürftigkeit** und Verfahrensart von Elektrolyse-Anlagen gestaffelt **nach Produktionskapazität**

Änderung der BauNVO

- **explizite Nennung von „Anlagen zur Herstellung und Speicherung von Wasserstoff“** in den § 8 Abs. 2 Nr. 1 und § 9 Abs. 2 Nr. 1 BauNVO
→ Elektrolyseure in Gewerbe- und Industriegebieten grundsätzlich zulässig

Kostenstruktur

In Bearbeitung

Methodik/Datengrundlage



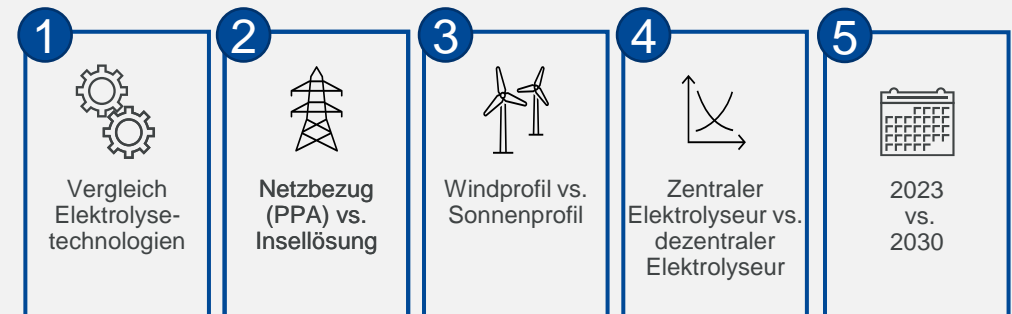
+ Vielzahl an Experteninterviews



Fallbeispiele

Aufbauend auf einem Standardfall

- Wirkungsgrad 65 %
- Volllaststunden 4.000 h
- Investitionskosten $1,2 \times 10^6$ EUR/MW
- Stromkosten 85 €/MWh

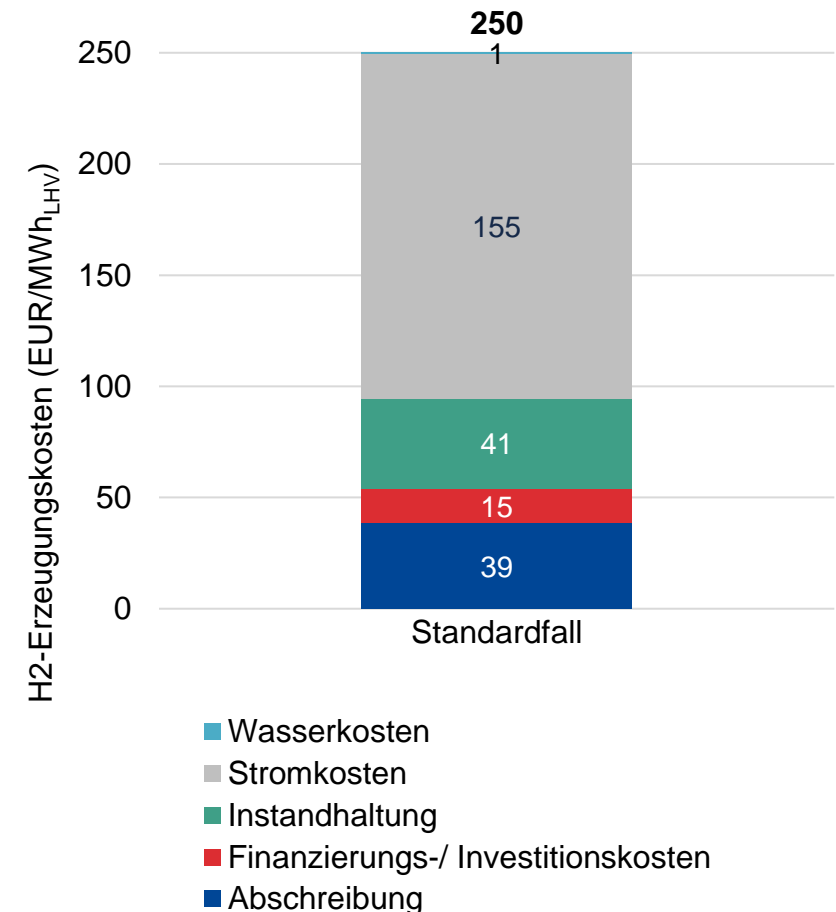


Kostenstruktur: „Standardfall: PEM“

„Standardfall: PEM“: Elektrolyseur 1 bis 5 MW; Strombezug: Offshore-PPA; Zeitpunkt Analyse: Ende 2023

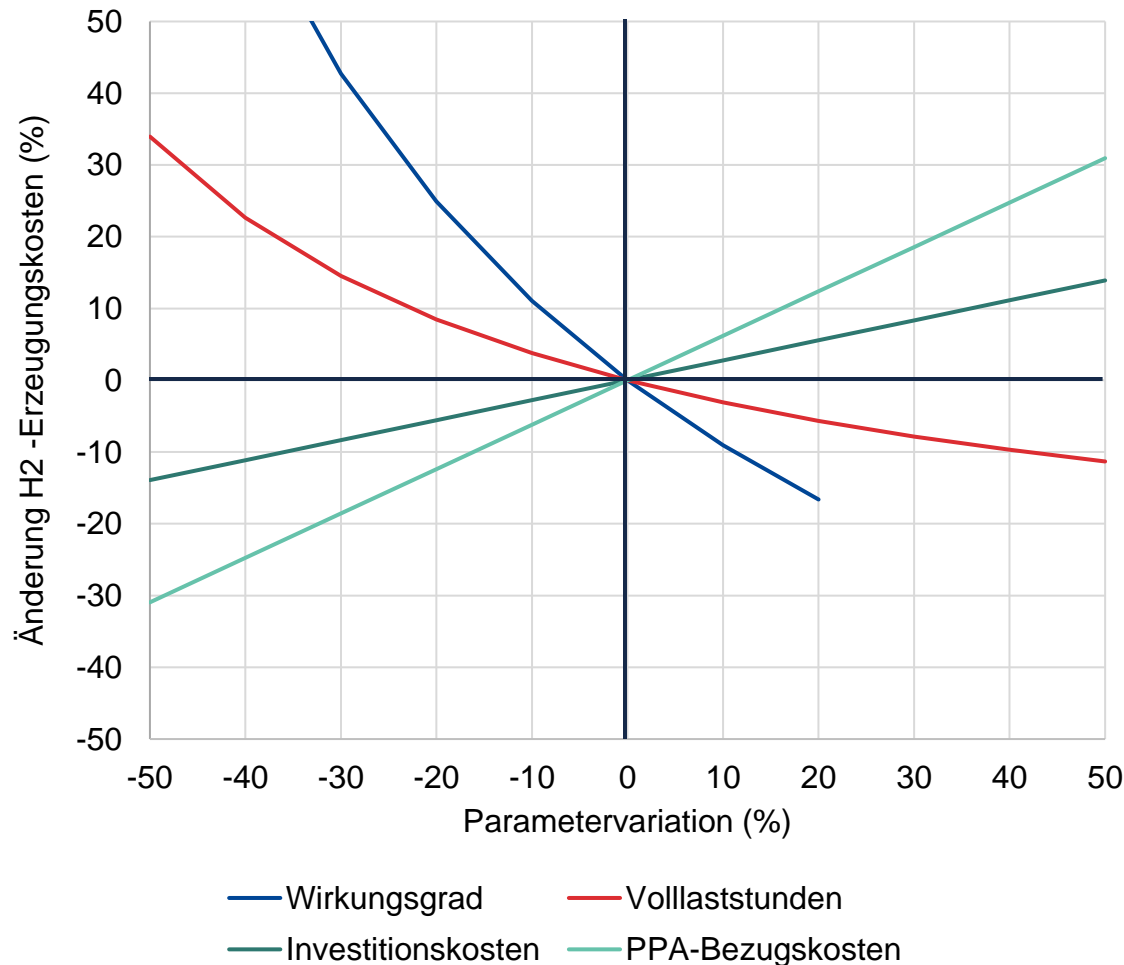
In Bearbeitung

	Einheit	Spannbreite in Literatur und Praxis	Gewählter Wert
PPA-Bezugskosten inkl. Stromnebenkosten	EUR/MWh	45 - 100	85
Wasserbezugskosten	EUR/m ³	1,8 - 2,0	1,9
CAPEX	EUR/MW	0,8 - 2,0 Mio.	1,2 Mio.
Zusätzliche CAPEX	EUR/MW	0,1 - 1,0 Mio.	0,5 Mio.
Fixe OPEX	% _{der CAPEX} /a	1,5 - 9,0	4,0
Wirkungsgrad	%	58 - 81	65
Volllaststunden	h/a	2.800 - 4.500	4.000
Stack-Lebensdauer	1.000 h	60 - 75	68
Verzinsung	%/a	2,0 - 6,0	3,4
Abschreibungsdauer	a	15-30	20



Kostenstruktur: „Standardfall: PEM“ | Sensitivitätsbetrachtung

In Bearbeitung



Anmerkungen

Definition Nullpunkt:

- Wirkungsgrad 65 %
- Volllaststunden 4.000 h
- Investitionskosten 1,2 Mio. EUR/MW
- Stromkosten 85 €/MWh

Fazit

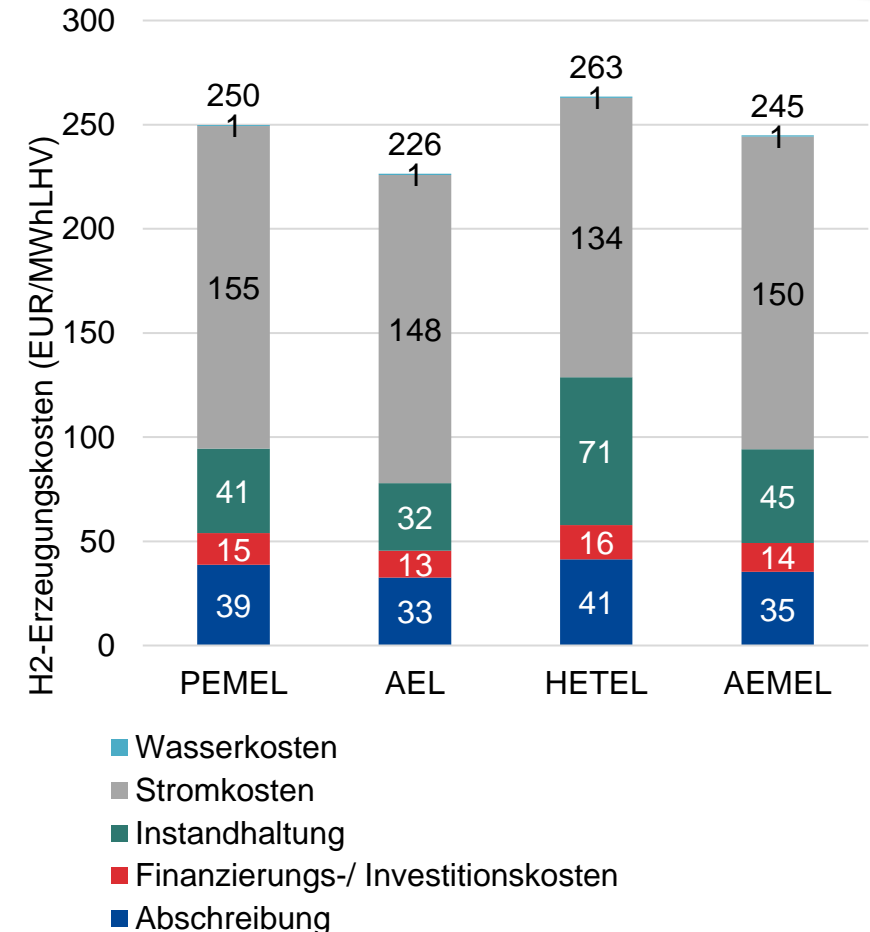
- Wirkungsgrad und Stromkosten beeinflussen den Business Case maßgeblich
- Bereits geringe Varianzen zeigen einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Erzeugungskosten
- Im Vergleich dazu wirken sich die Investitionskosten deutlich weniger sensitiv auf die Erzeugungskosten aus

Kostenstruktur: Fallbeispiel 1 | Vergleich Elektrolyseurtechnologien

Fallbeispiel 1: Elektrolyseure 1 bis 5 MW; Unterschiede in CAPEX, Wirkungsgrad, Stack-Lebensdauer

In Bearbeitung

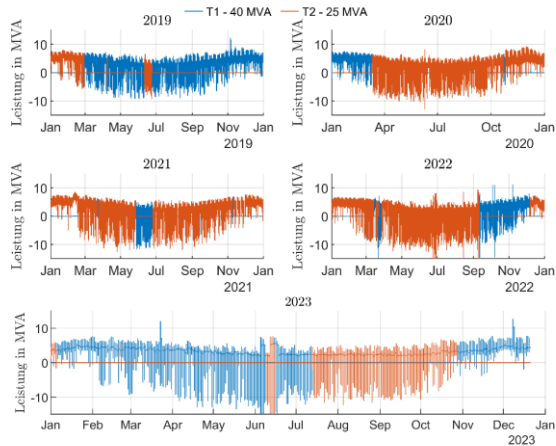
	Einheit	PEMEL	AEL	HTEL	AEMEL
PPA-Bezugskosten inkl. Stromnebenkosten	EUR/MWh	85			
Wasserbezugskosten	EUR/m ³	1,9			
CAPEX	EUR/MW	1,2 Mio.	1,0 Mio.	1,6 Mio.	1,1 Mio.
Zusätzliche CAPEX	EUR/MW	0,5 Mio.			
Fixe OPEX	% _{der CAPEX/a}	4,0			
Wirkungsgrad	%	65	68	75	67
Volllaststunden	h/a	4.000			
Stack-Lebensdauer	1.000 h	68	82	20	35
Stack-Austausch	% _{der CAPEX}	30			
Verzinsung	%	3,4			
Abschreibungsdauer	a	20			



Stromnetzanalyse: Methodik

In Bearbeitung

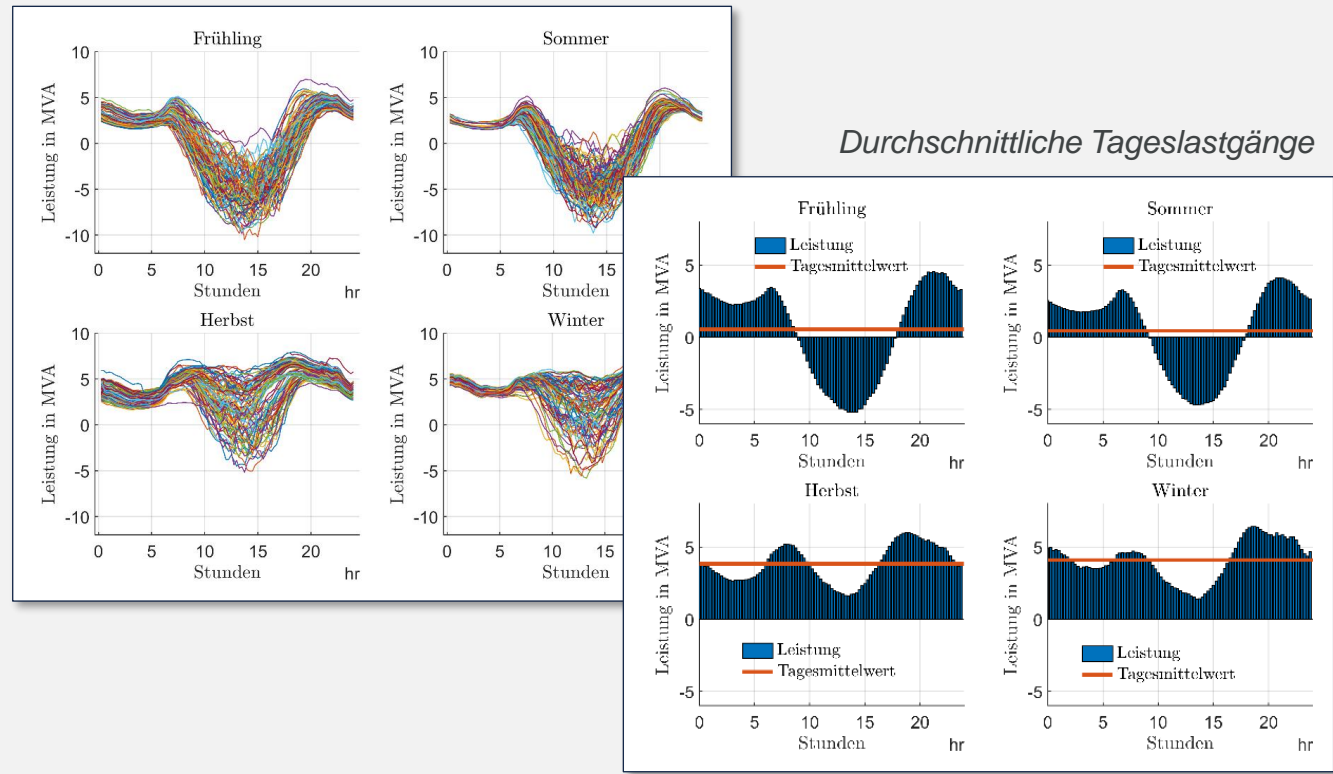
Lastgänge als Datengrundlage



- Historische Zeitreihendaten der über 15 Minuten gemittelten Transformatorleistung

Analyseergebnis A

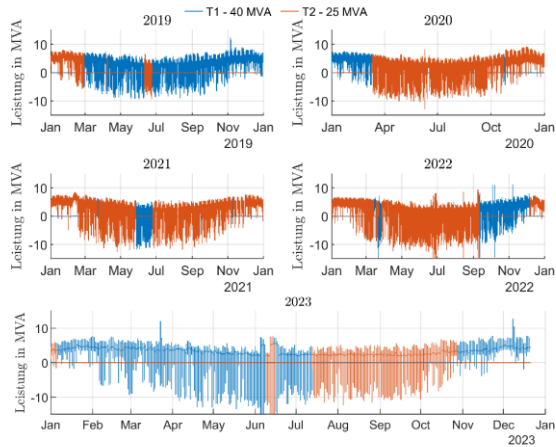
- Identifizierung der dominanten Einspeisung und Lasten, z.B. PV, Haushalte, Industrie
- Ermittlung, ob Gebiet grundsätzlich einspeise- oder lastdominiert ist



Stromnetzanalyse: Methodik

In Bearbeitung

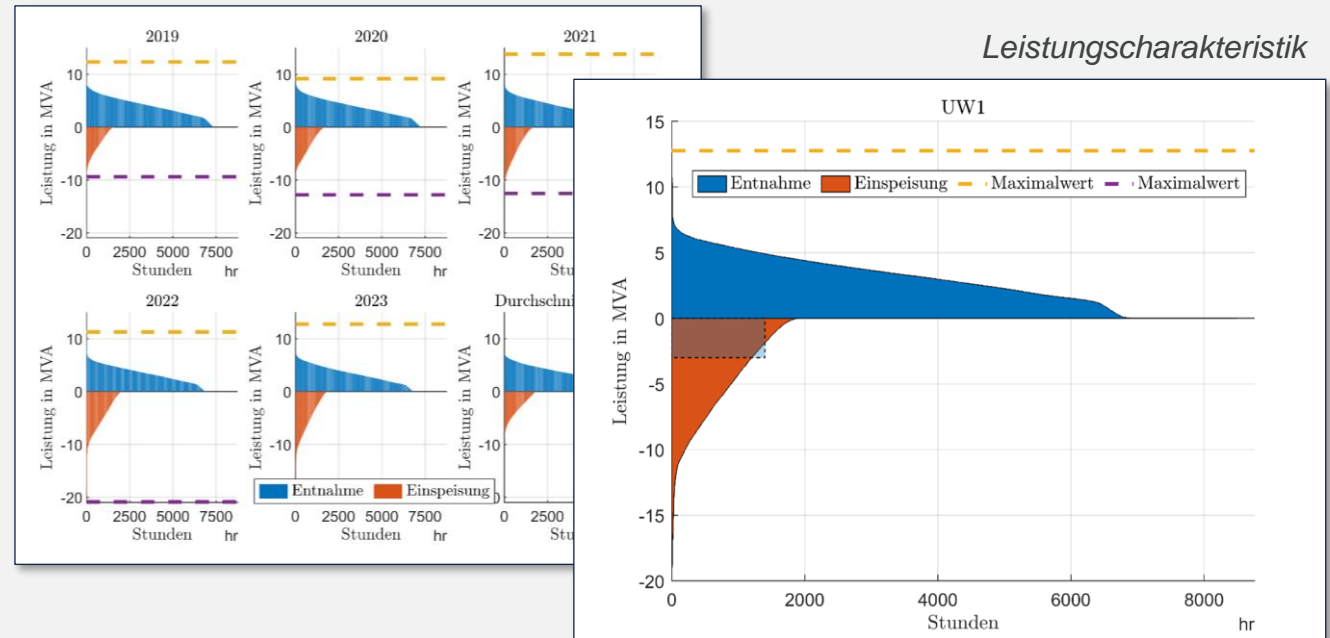
Lastgänge als Datengrundlage



- Historische Zeitreihendaten der über 15 Minuten gemittelten Transformatorleistung

Analyseergebnis B

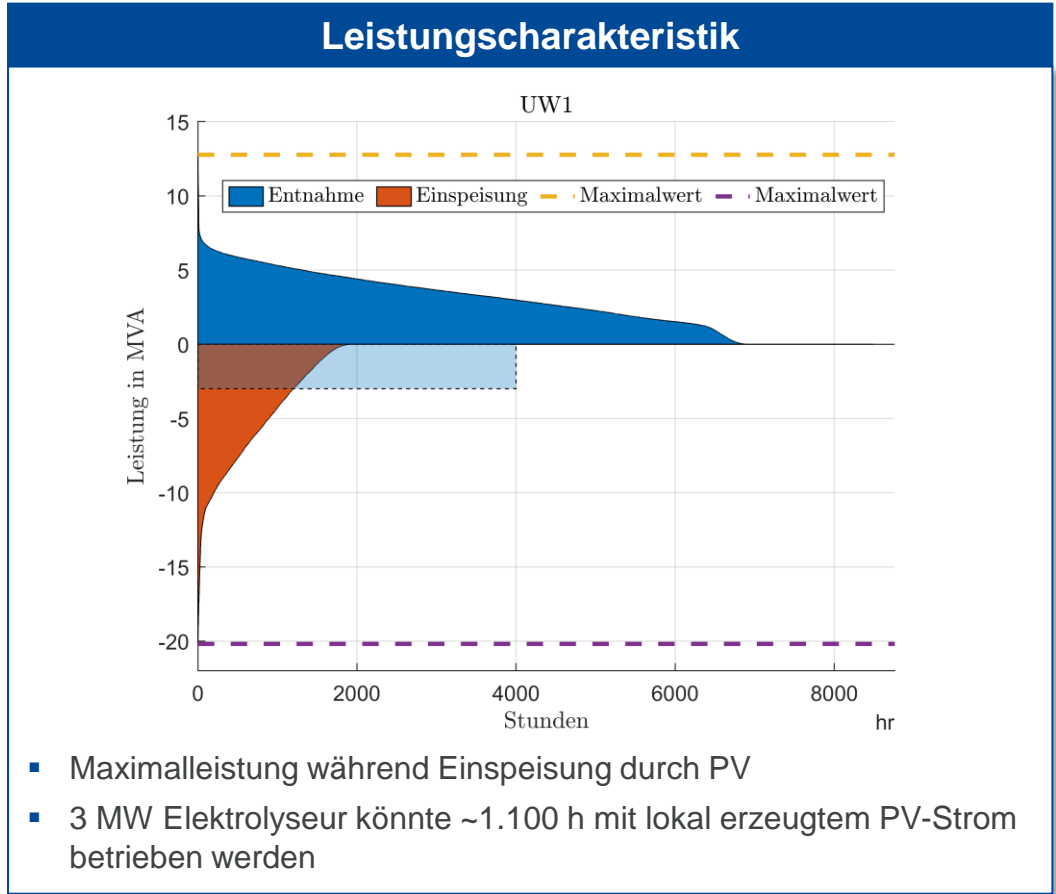
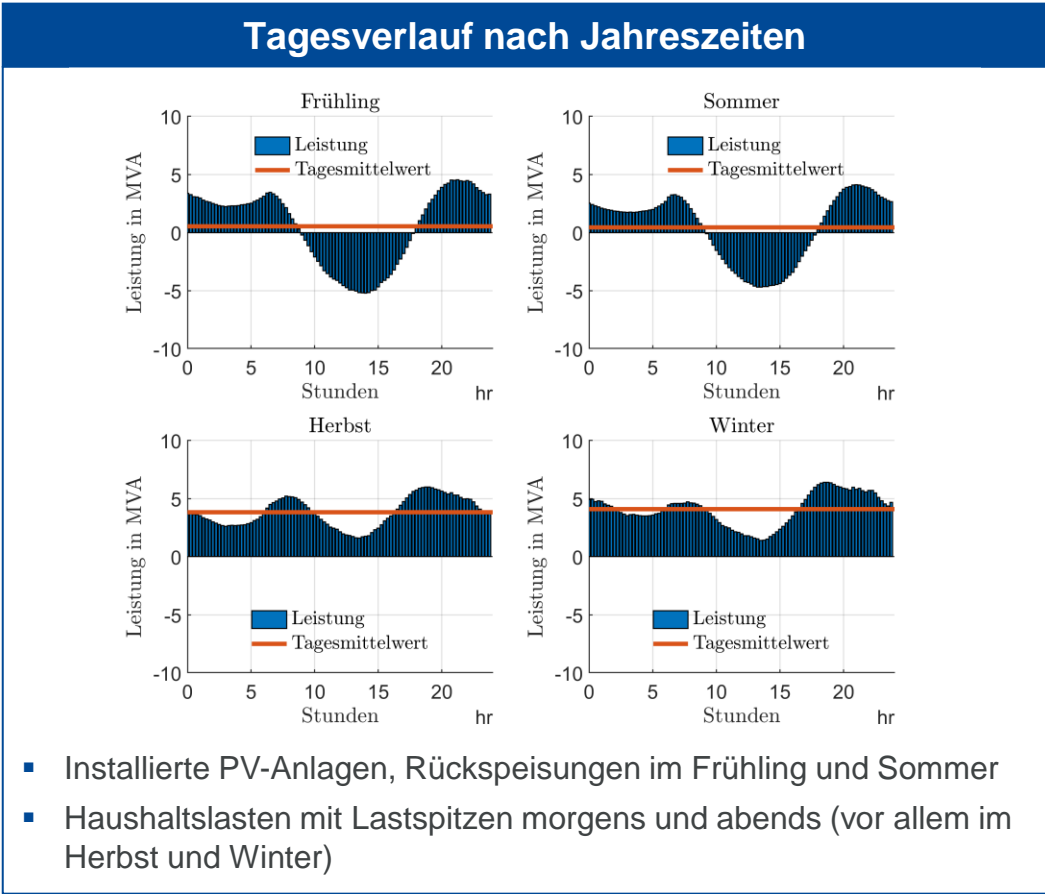
- Bestimmung netzdienlicher Elektrolysekapazität
- Spitzenlasten mit entsprechender Dauer direkt ablesbar
- Jährliche Stunden der Stromeinspeisung bzw. Entnahme erkennbar
- Einfluss von zusätzlicher Last oder Einspeisung auf das Lastprofil generell einfach identifizierbar



Stromnetzanalyse: Beispielhafte Analyseergebnisse

In Bearbeitung

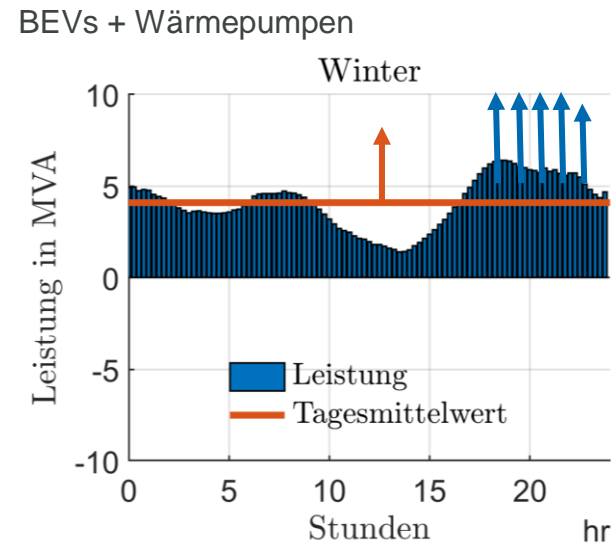
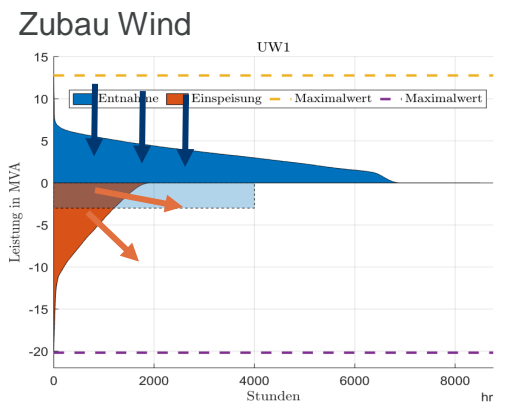
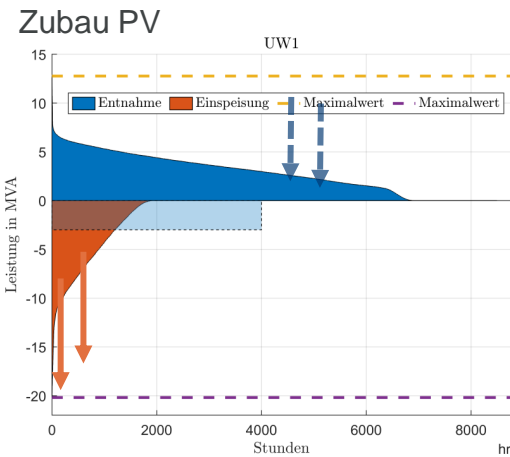
Analyse des Untersuchungsraums (UW1): 2 HS/MS-Transformatoren, 25 MVA und 40 MVA, in Wechselbetrieb ins 20 kV Mittelspannungsnetz (n-1)



Stromnetzanalyse: Beispielhafte Analyseergebnisse

In Bearbeitung

Analyse des Untersuchungsraums (UW1): 2 HS/MS-Transformatoren, 25 MVA und 40 MVA, in Wechselbetrieb ins 20 kV Mittelspannungsnetz (n-1)



Qualitative Einschätzung bezüglich dezentraler Elektrolyseanlagen

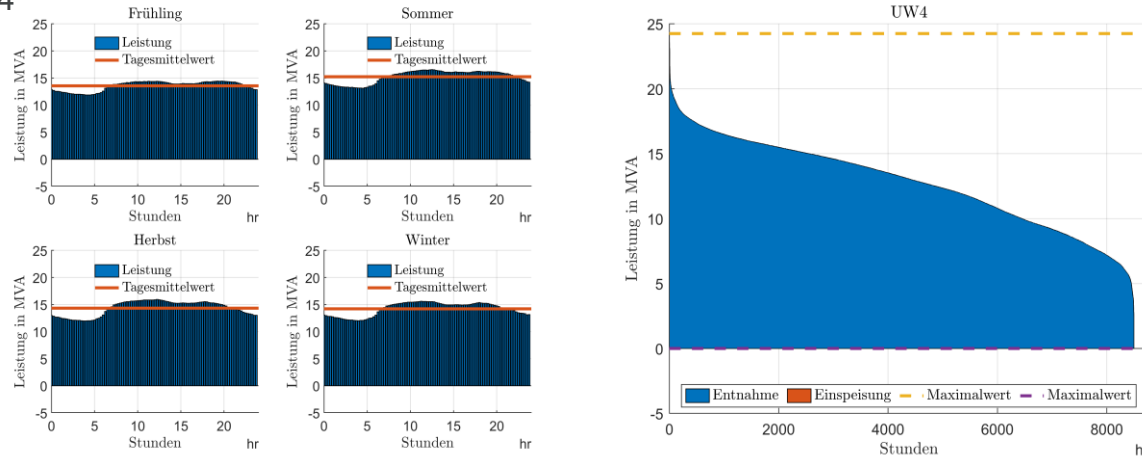
- Saisonale lokale Überschüsse durch PV
- Lastspitzen in den Abendstunden (Haushalte)
 - Erhöhen sich bei zukünftigen Zusatzlasten
 - Intelligentes Netzlastmanagement senkt Spitzen
- Lastspitzen (Schnellladeparks) sehr schwer zu antizipieren
- Weiterer Zubau von PV erhöht Leistungsspitzen
 - Maximallast aktuell bei Einspeisung, in Zukunft noch kritischer nach Einschätzung Netzbetreiber
 - Elektrolyseur kann Leistungsspitzen der Einspeisung reduzieren und Ausbau des UW verringern

Stromnetzanalyse: Beispielhafte Analyseergebnisse

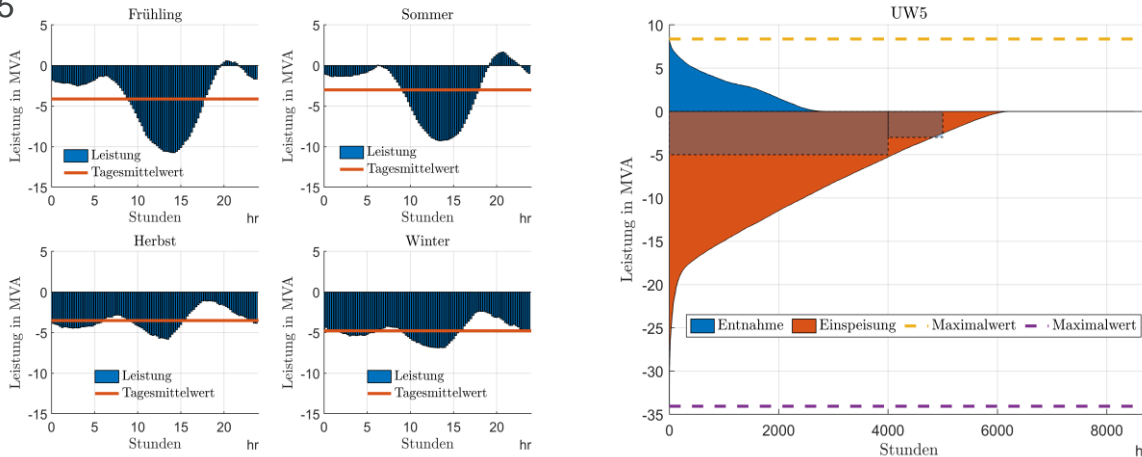
In Bearbeitung

Analyse des Untersuchungsraums (UW4 und UW5)

UW4



UW5



Qualitative Einschätzung bezüglich dezentraler Elektrolyseanlagen

UW4

- Gleichmäßiges, vorhersehbares Lastprofil durch Großverbraucher
- Elektrolyseur prinzipiell möglich, jedoch nicht mit lokal erzeugtem grünen Strom betreibbar

UW5

- Sehr stark geprägt durch Einspeisung von Wind und PV
- Spitzenleistung des Transformators bereits nahezu erreicht
- Elektrolyseur (ca. 5 MW; ca. 4.000 Stunden) kann hier mit lokalem grünen Strom betrieben werden und den Ausbau des UWs reduzieren

Stromnetzanalyse: Ausblick | Technisch-wirtschaftliches Optimum

In Bearbeitung

Schritt 1: Zur Verfügung stehende Maximalkapazität der Umspannwerke und dazugehörige Strompreise

- Identifizierung der potenziellen Elektrolyseur-Anlagengrößen mit zugehöriger Vollaststundenzahl
- Definiert als Punkt auf der sortierten, zur Verfügung stehenden Lastkapazität

Schritt 2: Ermittlung der Wasserstofferzeugungskosten in Abhängigkeit der Elektrolyseurgröße

- Die Wasserstofferzeugungskosten sind im wesentlichen von den potenziellen Vollaststunden eines Elektrolyseurs und dem Strompreis abhängig

Schritt 3: Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums

		Elektrolyseleistung	
		5 MW _{el}	10 MW _{el}
Absatzpreis	300 EUR/MWh	xx EUR	xx EUR
	350 EUR/MWh	xx EUR	Wirtschaftliches Optimum
	400 EUR/MWh	xx EUR	xx EUR

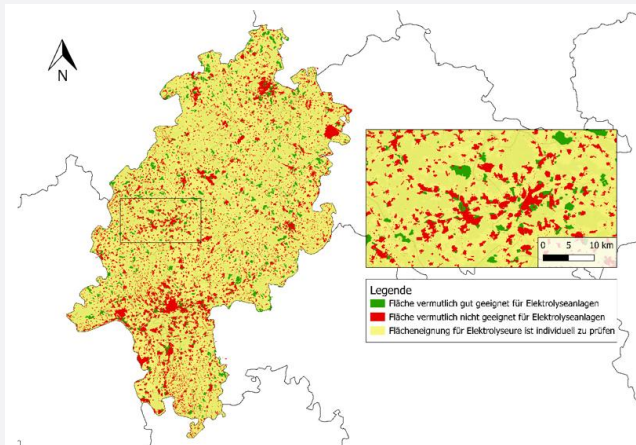
- Ermittlung des standort- bzw. lastspezifischen wirtschaftlichen Optimums für verschiedene Absatzpreise

Eignungsgebiete: Identifikation potenziell geeigneter Standorte

In Bearbeitung

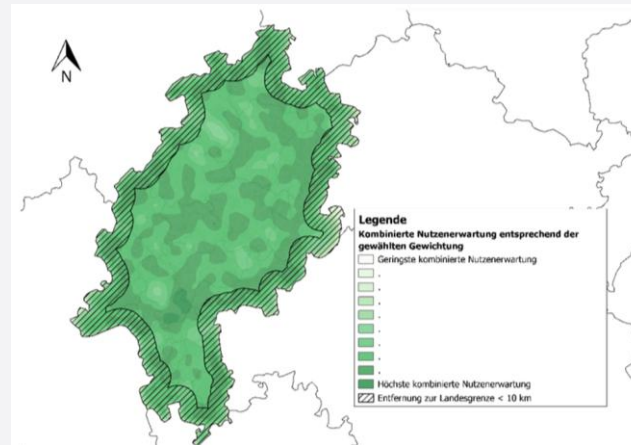
Erzeugung von einer „Hessen-Karte“ pro Betrachtungsperspektive

Regulatorik



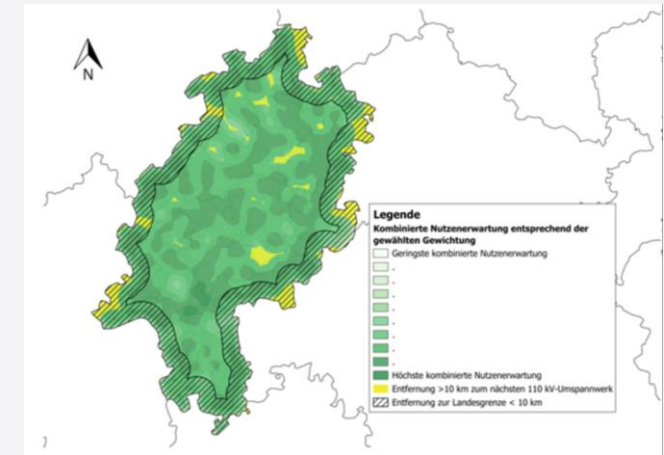
- Fokus auf die regulatorisch bedingten Ausschluss- bzw. Vorranggebiete
- Darstellung der Bedeutung der Prüfung im Einzelfall durch „gelbe“ Flächen

Kostenstruktur



- Nähe Umspannstationen (110 kV)
- Nähe EE-Anlagen
- Wasserstoffbedarfe (Verkehr)
- Nutzwärmebedarfe (Wärmeatlas)

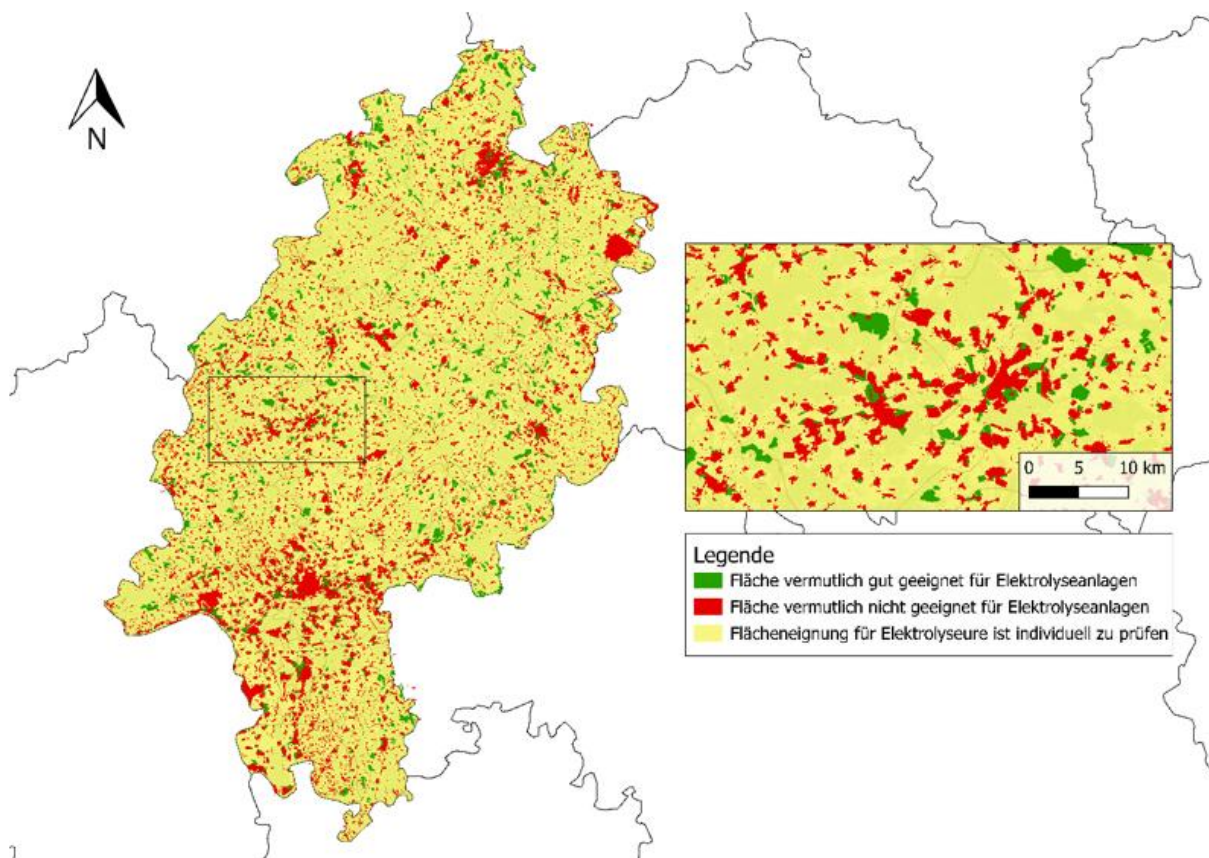
Analyse Stromnetze



- Nähe Umspannstationen (110 kV)
- Nähe EE-Anlagen

Eignungsgebiete: Perspektive Regulatorik

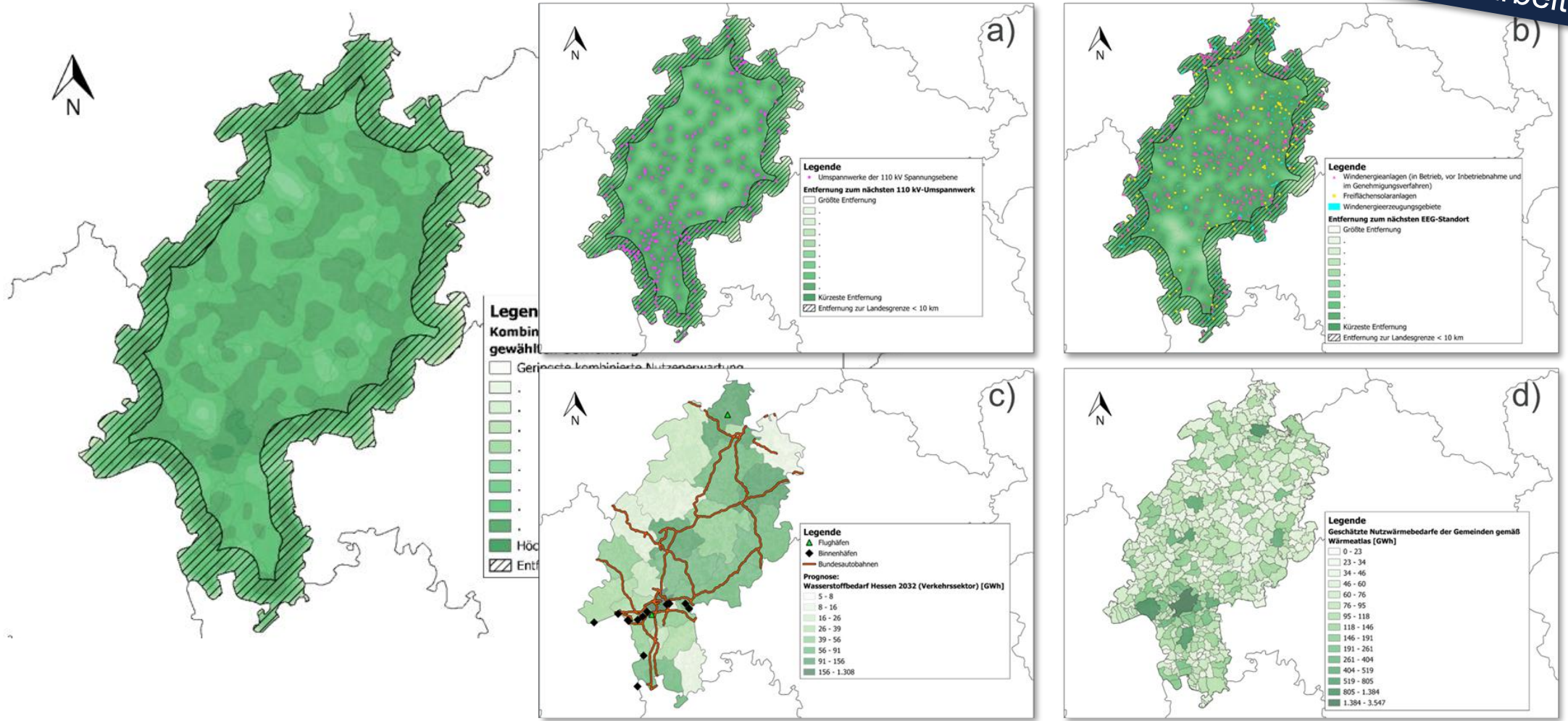
In Bearbeitung



Einfärbung Standorteignung	Enthaltende Elemente
Grün Fläche vermutlich gut geeignet	<ul style="list-style-type: none"> – Windenergieanlagen (+100m Puffer) – Ausgewiesenen Windenergieerzeugungsgebiete (+100m Puffer) – Freiflächensolaranlagen (+100m Puffer) – Industrie- und Gewerbeflächen
Rot Fläche vermutlich nicht geeignet	<ul style="list-style-type: none"> – Ortslagen, Wohnbau- und Gemischnutzungsflächen – Siedlungsflächen in Bestand und Planung – Naturschutzgebiete – Trinkwasserschutzgebiete (I, II, II/1, II/2, II/3)

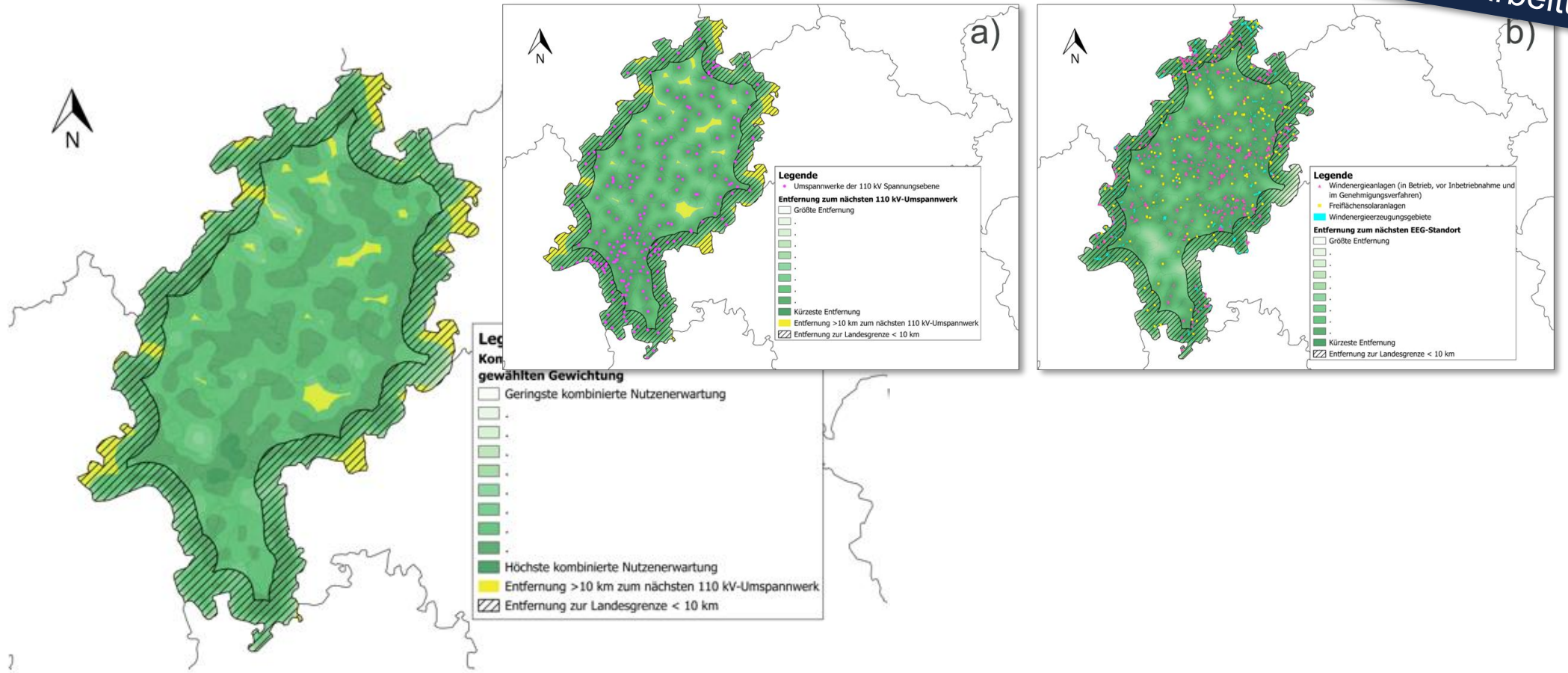
Eignungsgebiete: Perspektive Kostenstruktur

In Bearbeitung



Eignungsgebiete: Perspektive Stromnetze

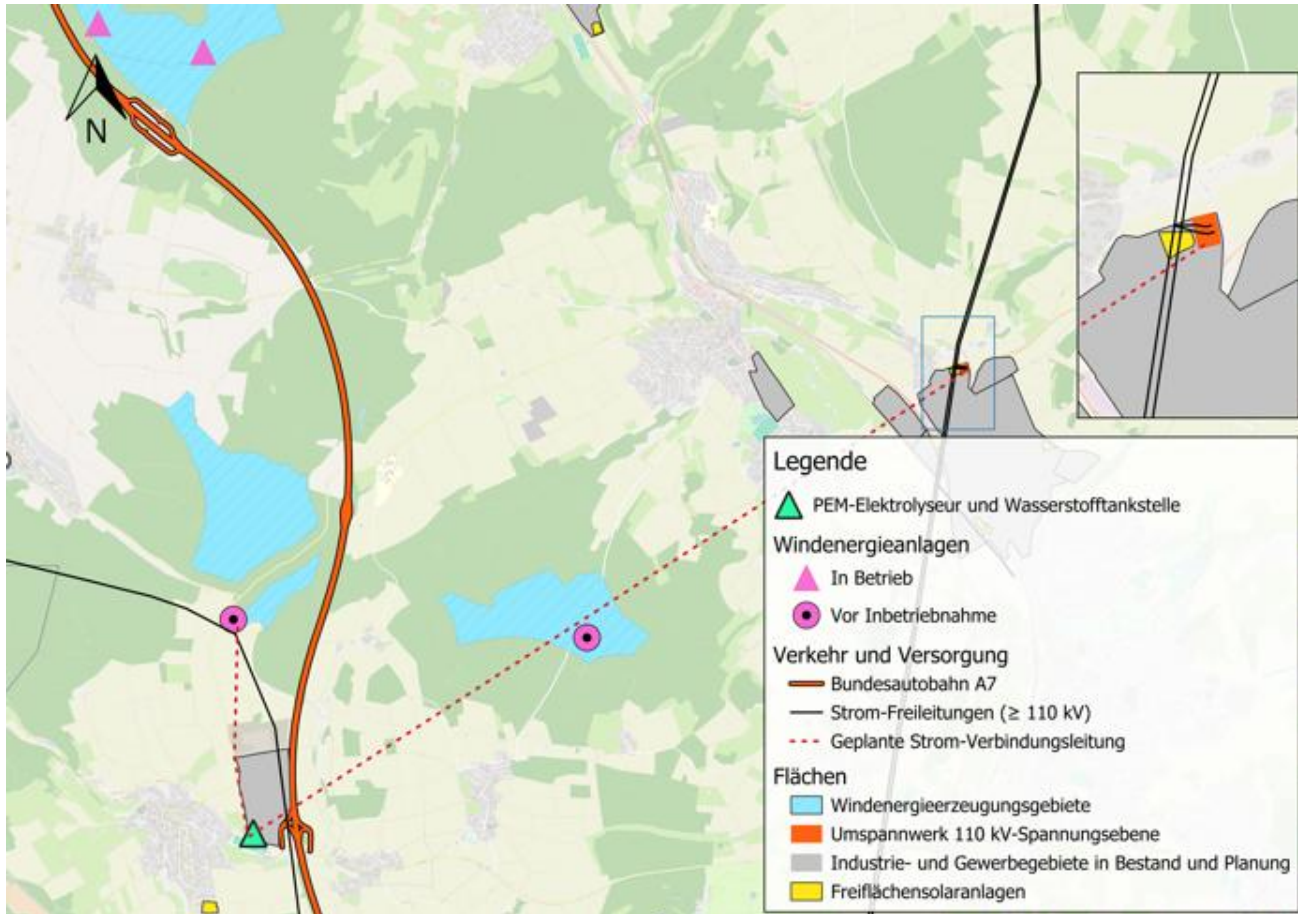
In Bearbeitung



Eignungsgebiete: Exkurs | Anwendungsbeispiel

In Bearbeitung

Standort des Projektbeispiels ABO Energy Hünfeld-Michelsrombach



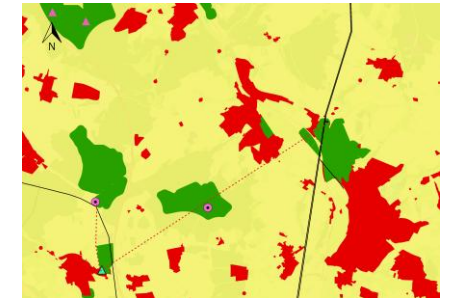
a) Regulatorik



b) Kostenstruktur



c) Stromnetz



Ableitung von Empfehlungen zur Erschließung der skizzierten Elektrolysepotenziale durch das Land Hessen

In Bearbeitung

Allgemein

- Zentrale Bündelung und Verfügbarkeit von maschinenlesbaren gepflegten (GIS-)Infrastrukturdaten:
 - Bebauungspläne, Flächennutzungspläne, etc.
 - Stromnetze inkl. Umspannstationen
 - Verkehrsinfrastruktur
 - Gas- und Wärmenetze
 - Etc.

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

- Rahmenbedingungen für **niedrige und stabile Strompreise** (inkl. Ausbau EE, Infrastruktur) schaffen/fördern
- **Förderung Kapazitätsausbau** bzw. Sicherung von Materialien/Bauteilen für den Netzausbau (bspw. Transformatoren)
- **Finanzielle Anreizsysteme** für Anlagen und Speicher, die zur Netzdienlichkeit beitragen

Regulatorische Rahmenbedingungen

- Aufstellung von **Bebauungsplänen** mit Ausweisung von **Sondergebieten für Elektrolyseure** (Bebauungspläne gehören zur kommunalen Selbstverwaltung einer Gemeinde nach Art. 28 GG)
- Landesrechtliche Abstandsvorgaben durch **Festlegung eines Abstandserlasses nach § 50 BImSchG** (vgl. NRW)

Infrastrukturelle Rahmenbedingungen

- **Aufbau Informationsbasis über Netzkapazitäten** (vgl. Österreich)
- Weitere Aktivitäten zur **Wasserstoffnetzerschließung**, vgl. Wasserstoff Backbone Rhein-Main-Gebiet sowie Nord-/Mittelhessen

Q & A



Dr. Eric Spinnräker

Ernst & Young Real Estate GmbH

Senior Manager

☎ +49 160 939 24944

✉ eric.spinnraeker@de.ey.com