

Von der Theorie zur Praxis:

Flexibilisierung und Eigenproduktion im Unternehmen

Flexibilisierung in der Industrie – Warum und wie wandeln sich Unternehmen?

Dr. Matthias Rehfeldt, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer ISI

Beispiele aus der Praxis: Analyse und Anpassung von Prozessen an Preissignale

Martin Seidler, Head of Research, ifesca GmbH



Moderation:

Ulrike Lilie
Projektleiterin

Kompetenzstelle Dekarbonisierung
ThEGA

Übergeordnete Themen der Session:

→ **Grundlagen des Strommarkts +
die Rolle der erneuerbaren Energien**

→ **Flexibilisierungsoptionen**

- Energiespeicherung
- Energieerzeugung
- Produktionsanpassung an Preissignale

→ **Analyse von Produktionsprozessen**

- Zur Reduzierung des Energieverbrauchs und von Lastspitzen
- dann Anpassung an Preissignale und Teilnahme am Strommarkt



Flexibilisierung in der Industrie - Warum und wie wandeln sich Unternehmen?

Dr. Matthias Rehfeldt

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer ISI

Flexibilisierung in der Industrie - Warum und wie wandeln sich Unternehmen? Matthias Rehfeldt (Fraunhofer ISI)

Thüringer Ressourcenkonferenz
REKON meets PIUS
11.9.2025, Weimar

Flexibilisierung in der Industrie - Warum und wie wandeln sich Unternehmen?

Inhalt



1. Einleitung und Motivation

1. Energiesystem und Strommarktpreise
2. Indirekte Emissionen der Elektrifizierung
3. Systemische Rolle von Flexibilisierung

2. Technisches Elektrifizierungspotential

1. Prozesswärmebedarf
2. Entwicklungsstand in verschiedenen Anwendungen
3. Rolle von Reinvestitionszyklen

3. Ökonomische Bewertung

1. Netzentgelte
2. Wirtschaftlichkeit elektrifizierter Prozesswärme
3. Hemmnisse

4. Zusammenfassung und Schluss

Der Umbau des Energiesystems hat Auswirkungen auf den Strommarkt

- Zeiträume hoher Einspeisung Erneuerbarer Energien sind korreliert mit niedrigen Großhandelspreisen für Strom
- Kausaler Zusammenhang ist über Angebot/Nachfrage plausibel
- Zukünftig stärker ausgeprägter Zusammenhang daher zu erwarten.

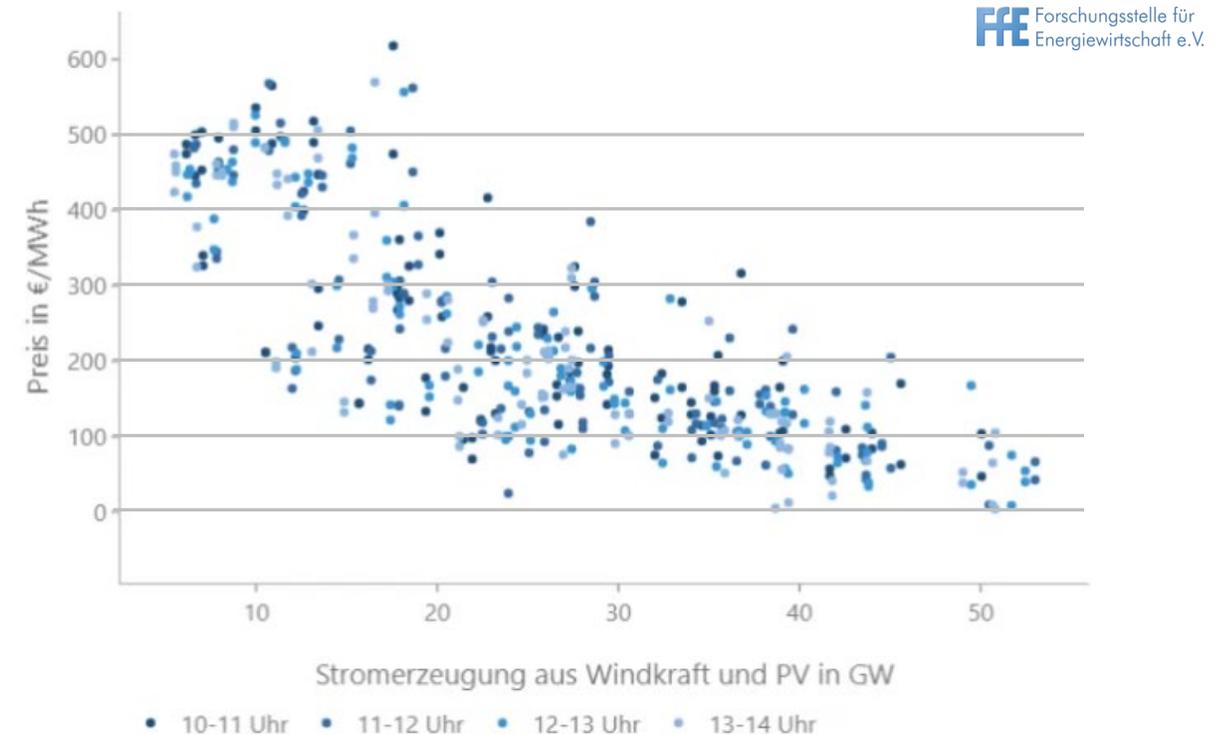


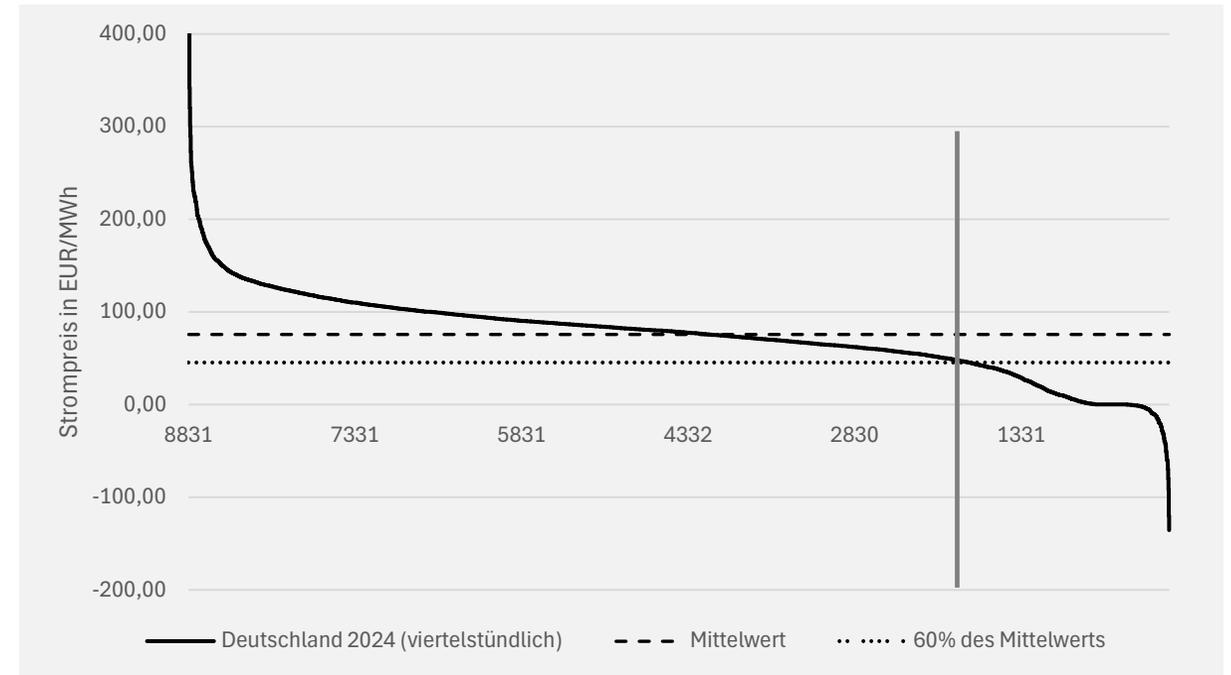
Abbildung 2: Korrelation Day-Ahead Preise und Einspeisung erneuerbarer Energieträger für 10.01.2022 bis 1912.2022, Werktage 10 bis 13 Uhr

<https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/entwicklung-der-energie-und-co2-preise-2022/>, angepasst.

Marktpreise für Strom variieren beträchtlich

- Mittelwert des Großhandelspreises für Strom 2024 lag bei etwa 75EUR/MWh
- Bis zu 1800 Stunden im Jahr lag der Preis aber bei 60% oder weniger davon.
- Nutzen dieser Niedrigpreisstunden (und Vermeidung der Hochpreisstunden) ist herausfordernd.

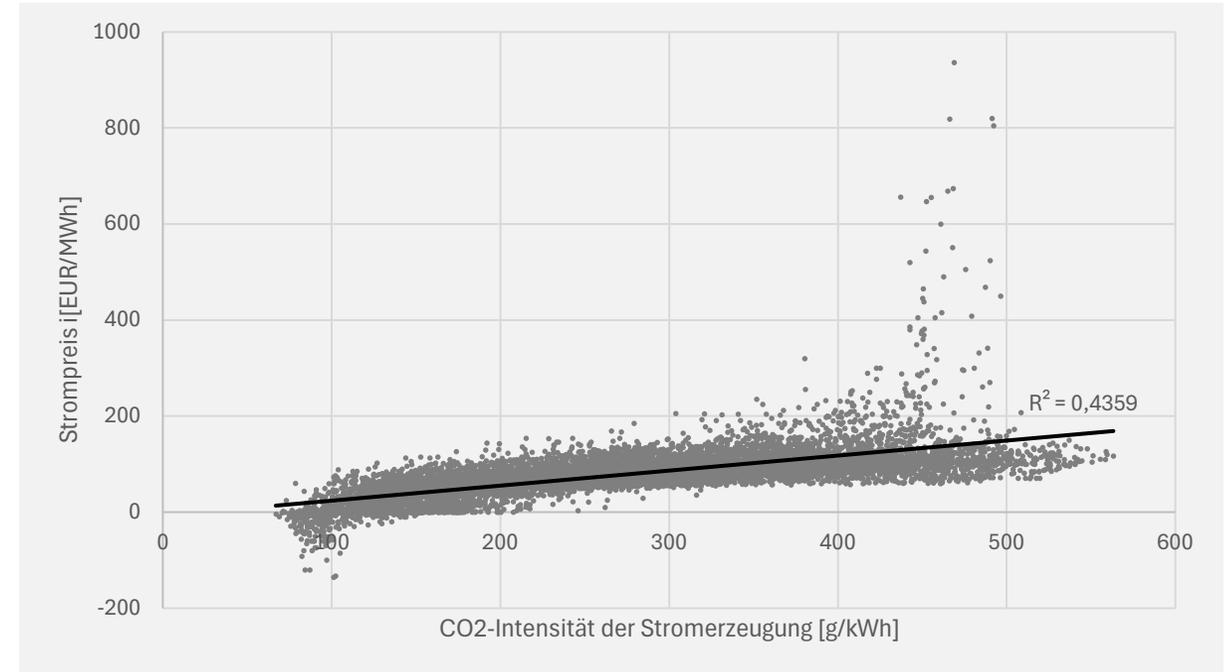
Flexible Nachfrage kann Preise senken



Geringe Marktpreise tendieren zu geringen Emissionen

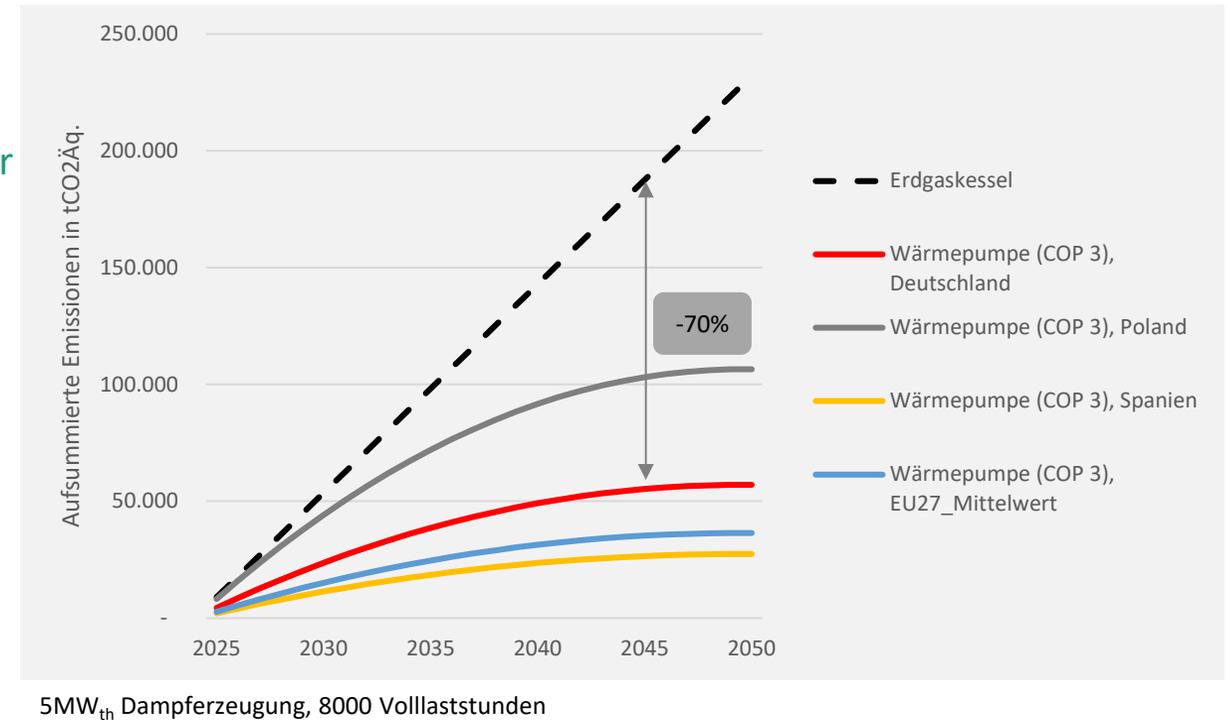
- Gleichzeitig entstehen niedrige Großhandelspreise bei geringer Emissionsintensität (durch hohe EE-Anteile)
- Hohe Großhandelspreise bedeuten, dass viele **thermische Kapazitäten** angefragt werden. Darin Steinkohle und Erdgas.
 - Reihenfolge nach Grenzkosten grob:
 - Erneuerbare
 - Abfall
 - Kernenergie
 - Braunkohle
 - Steinkohle
 - Erdgas/Mineralöl

Nutzen geringer Strompreise ist klimafreundlich



Elektrifizierung durch Wärmepumpen reduziert Emissionen

- **Hohe Effizienzgewinne (COP ~3)** verringern die indirekten Emissionen der Elektrifizierung weiter.
- **Treibhausgasemissionen** von Wärmepumpen sind unmittelbar selbst in sehr emissionsintensiven Ländern **geringer als die eines Erdgaskessels**.
- Mit steigendem CO₂-Preis wird dies auch **wirtschaftlich** relevanter.

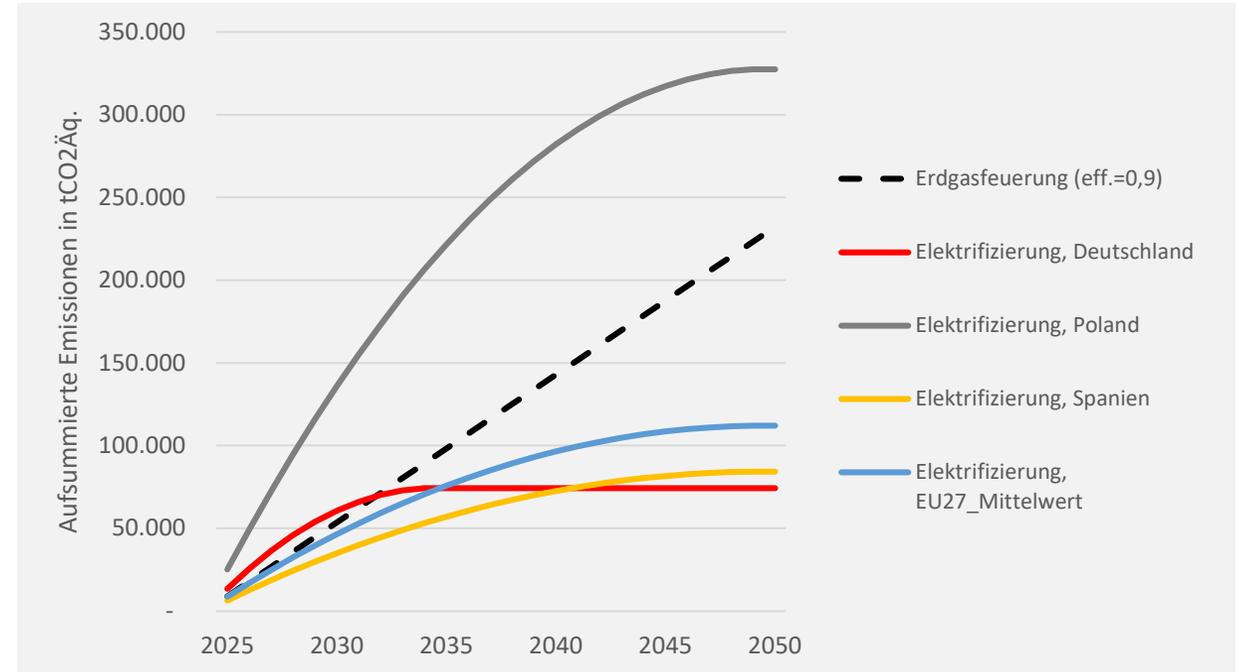


*COP = Coefficient of Performance; mit COP 2 werden Emissionen um 55% (statt 70% gemindert)

Hohe Temperaturen haben größere Herausforderungen

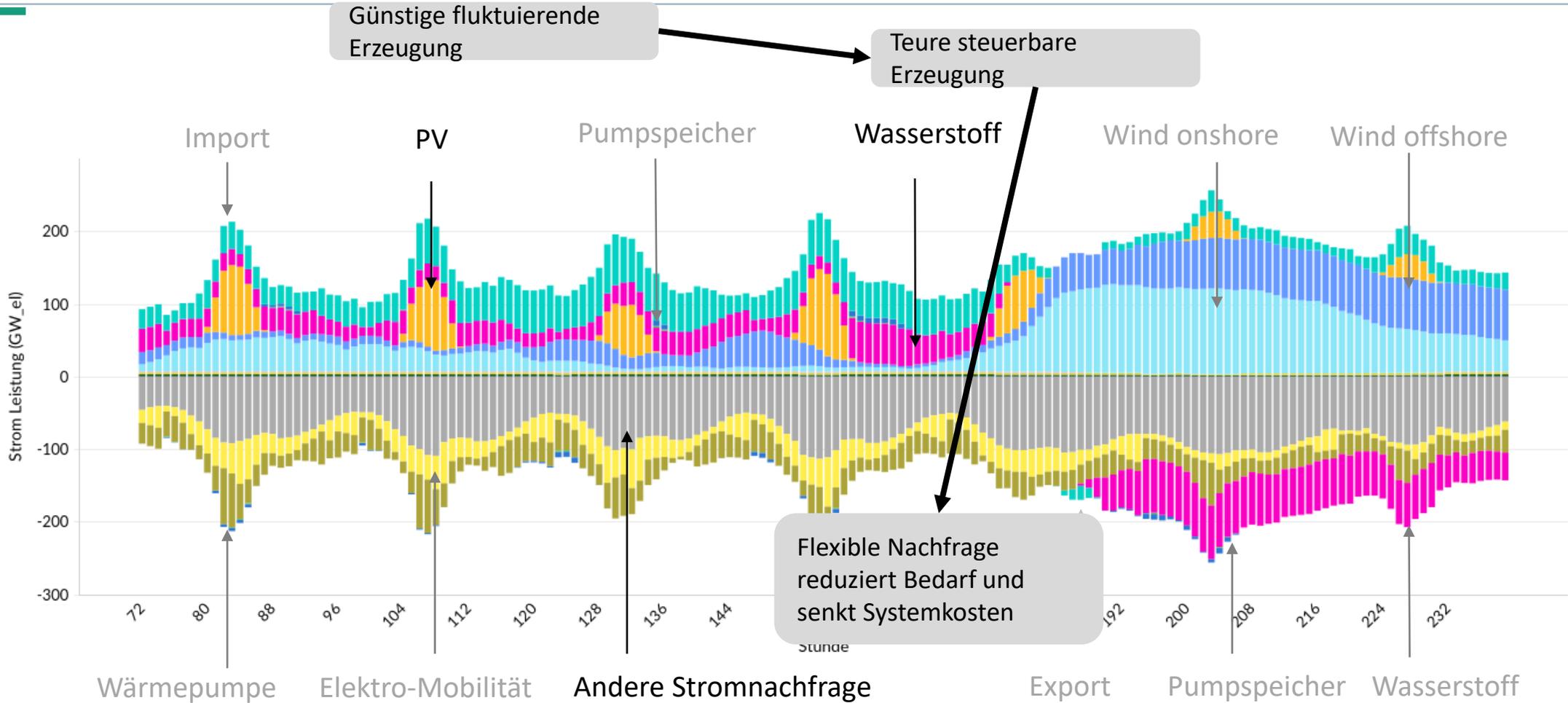
- Elektrifizierung in Industrieöfen auf hohen Temperaturen bietet geringere Effizienzvorteile.
- Meist ist die **Lebensdauerbetrachtung** notwendig, um Emissionseinsparungen festzustellen. Zudem ist die weitere **Dekarbonisierung des Stromsystems*** notwendig.

Elektrifizierung senkt meist bereits heute Emissionen.



*Beispielrechnung unterstellt lineare Verringerung der Emissionsintensität aller Länder bis 2050. Deutschland will dies bis 2035 umsetzen.

Nachfrageflexibilität kann Systemkosten senken



Szenario T45-Strom: Strom Dispatch in Deutschland in der Kalenderwoche 01 2045



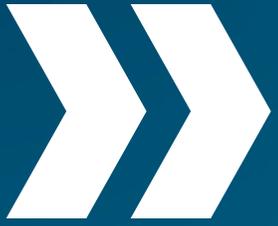
Quelle: Langfristszenarien 3 - Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands, (2022), Studie für das BMWK (<https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>)

Flexible Elektrifizierung hat viele mögliche Vorteile

Preise, Emissionen, Systemdienlichkeit



1. Was sind technische Potentiale zur Elektrifizierung?
2. Warum ist es noch schwer, diese Potentiale zu nutzen?
3. Was sollte getan werden, um das zu verbessern?

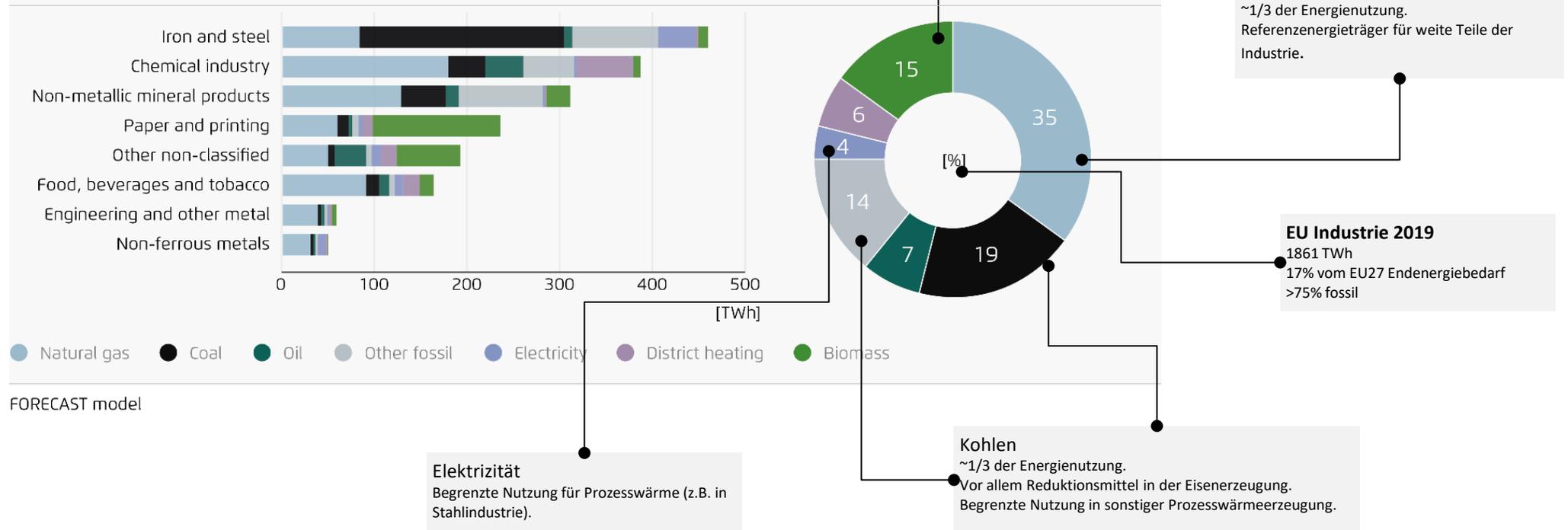


Technische Optionen zur Elektrifizierung von Prozesswärme

Bedarf nach Grundstoffen und deren Weiterverarbeitung wird bleiben ...aber die Verfahren müssen sich ändern.



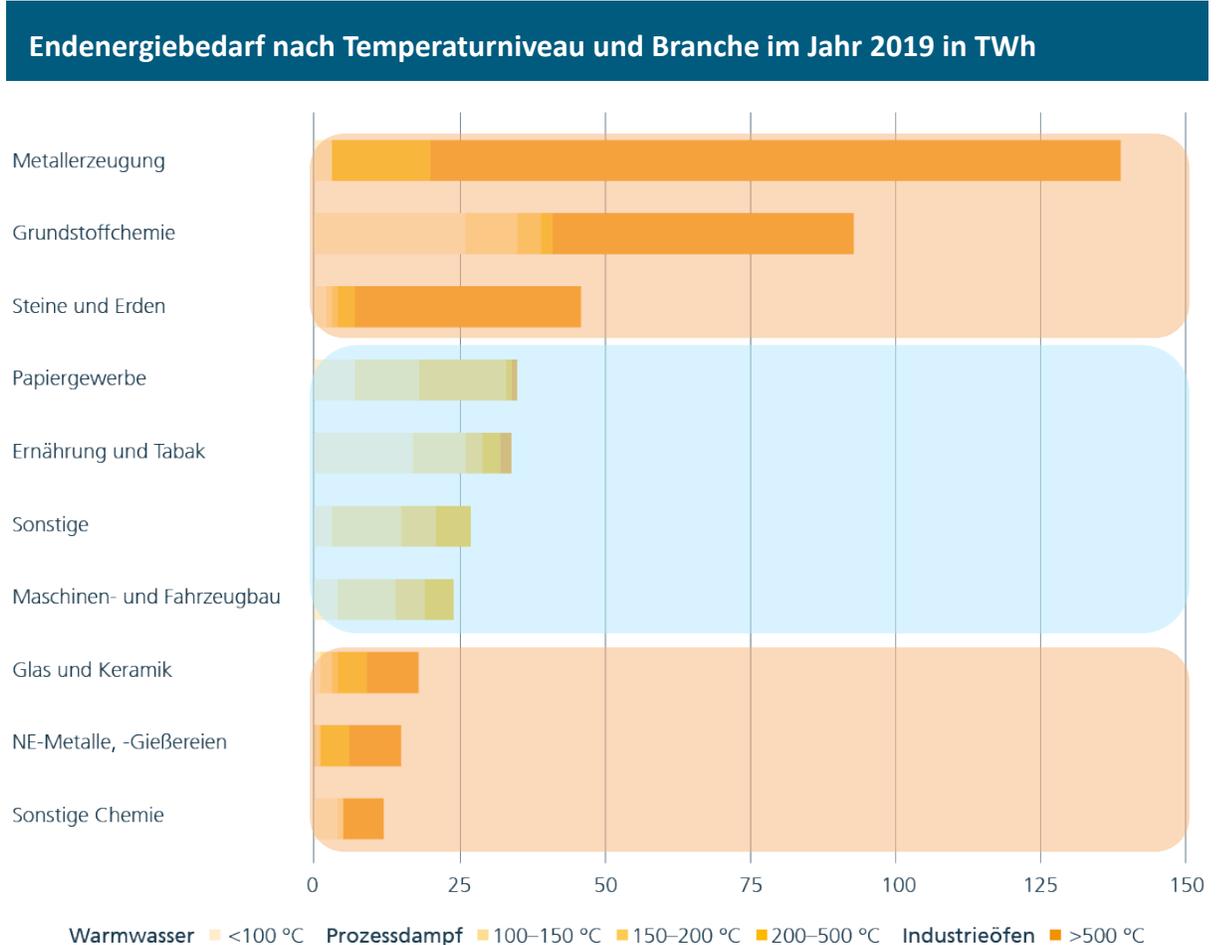
Estimated total final energy demand for process heating in 2019 by temperature and energy carrier in the EU27 countries → Fig. 5



Daten: UNFCCC, Eurostat, AGEB, Fraunhofer ISI

Elektrifizierungspotentiale der Branchen unterscheiden sich nach Temperaturbereich

- **Prozessdampf wird meistens unter 200°** genutzt und Technologien ähneln sich auch über die Branchen hinweg. Erdgaskessel oder KWK-Anlagen sind Standard.
-> Lösungen wirken branchenübergreifend
- **Prozesswärme > 500°C** wird in prozessspezifischen **Öfen** bereitgestellt und die Technologiestruktur ist sehr vielfältig
-> Lösungen wirken anwendungsspezifisch



Herausforderungen hoher Temperaturen sind in Technologieentwicklung sichtbar

Für alle betrachteten Anwendungen sind **CO₂-neutrale Alternativtechniken in der Entwicklung** – allerdings mit unterschiedlichem Technologiereifegrad.

Herausforderungen:

- **Hochskalierung** auf industrielles Niveau
- **Energiedichte** in Hochtemperaturanwendungen
- Fehlende **wirtschaftliche Anreize** zur Technologieentwicklung
- Elektrifizierung ist der Metallindustrie in einigen Anwendungen etabliert; in der **Mineralindustrie** noch nicht als Pilotanlagen verfügbar.

Technologiereifegrad (TRL) von Elektrifizierungstechniken

Sektor	Branche	Anwendung (gruppiert)	Strom
Metalle	Stahl	Rohstahlerstellung (primär)	<3
		Walzwerk: Wärmebehandlung Flachstahl	<4
		Walzwerk: Kontinuierliches Erwärmen Flach-/Langstahl	<3
	Gießereien	Schmelzen Aluminium	9
		Schmelzen Gusseisen (Kupolofen)*	<4/9
	Härtereien	Aufkohlen und Austenitisieren	9
		Kontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile	<5
	Umformtechnik	Diskontinuierliche Erwärmung Schmiedebauteile	<3
		Kontinuierliche Erwärmung Stahlblechzuschnitte	9
		Schmelzen/Warmhalten, Homogenisieren/Erwärmen	9
	Aluminium	Schmelzen, Erwärmen, Wärmebehandlung Halbzeug	9
		Mineralien	Glas
	Schmelzen Flachglas		<3
Ziegel,	Brennen Ziegel		<4
Keramik	Brennen Feuerfeststeine		<4
Zement	Brennen Zementklinker		<3
Kalk	Brennen im Schachtofen		<2
	Brennen im GGR-Ofen		<3
	Brennen im Drehrohrofen	<3	
Dampf	Chemie	Chemiepark-Dampfversorgung***	9/5–6
	Papier	Papiertrocknung***	9/7–8
	Nahrung	Milchpulverherstellung***	9/7–8

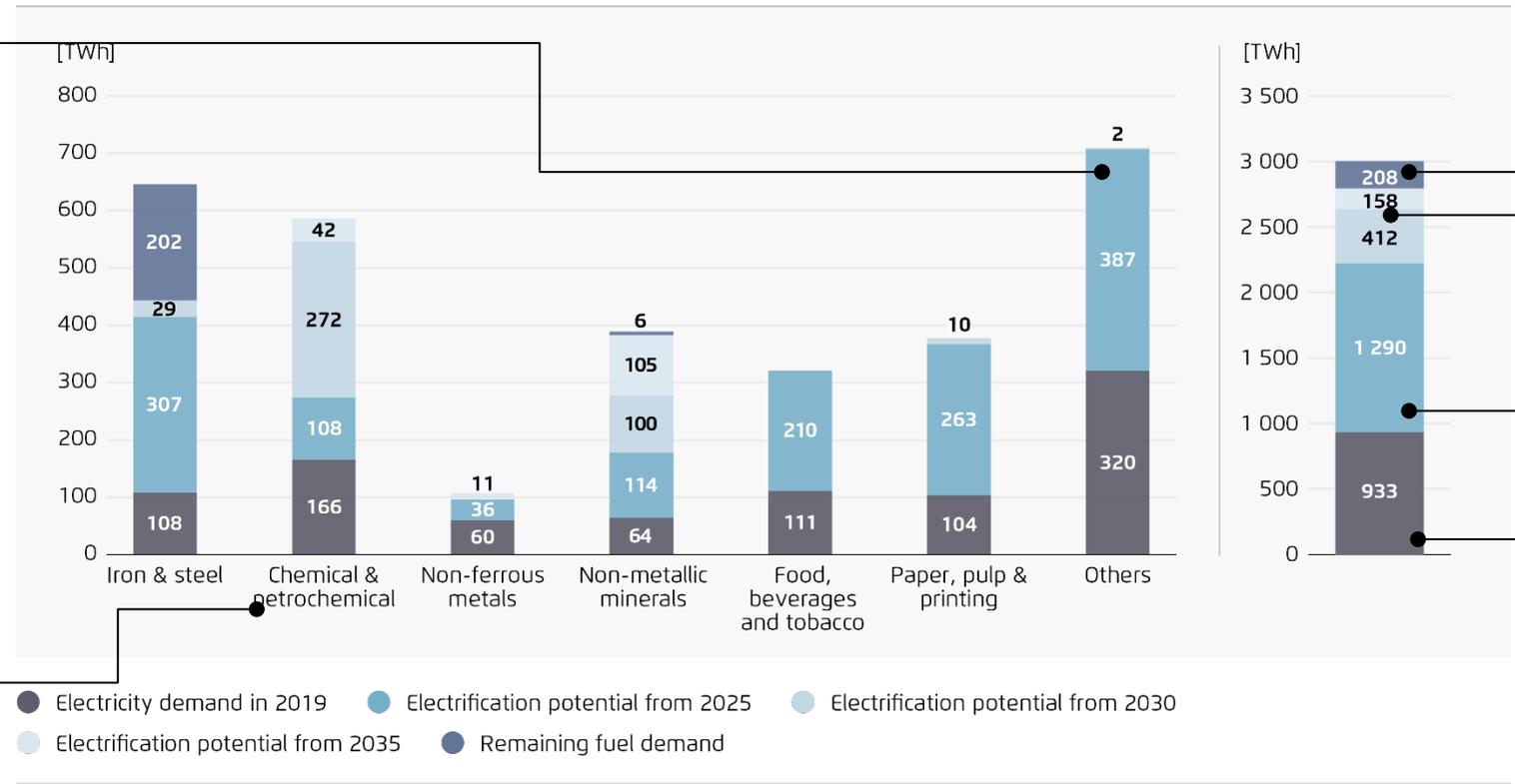


Umfangreiche Elektrifizierung ist technisch möglich ...wenn Technologien erprobt und eingesetzt werden



Nicht-energieintensive Branchen
 zeigen bereits ein hohes Niveau direkter Elektrifizierung. Sie benötigen nur etwa 25% der Endenergie der Industrie. Gleichzeitig decken sie etwa 75% der Wertschöpfung und Beschäftigung ab. Dieses Verhältnis wirft Fragen zu Wertschöpfungsketten und Green/Carbon Leakage auf.

Technical potentials for direct electrification by industrial sector (left) and total (right) in the EU 27 based on 2019 energy demands → Fig. 1



Stoffliche Nutzung
 im Chemiesektor fügt weitere 800-1000 TWh von Molekülen abhängigen Energieträgerbedarf hinzu. Zusammen mit Direktreduktion zu Eisen bildet diese Anwendung das Rückgrat des industriellen Wasserstoffbedarfs.

Weniger als 10% benötigen Moleküle aus technischen Gründen. Vor allem Reduktion von Eisenerz. Hinzu kommt der nicht-energetische Bedarf der Chemieindustrie.

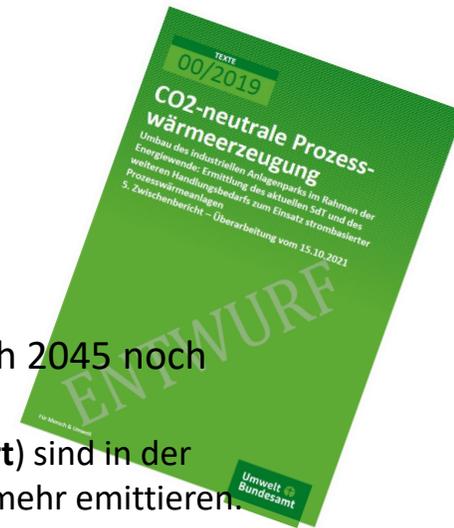
Weitere 20% benötigen relevante Technologieentwicklung (nach 2030/2035). Darunter oft Hochtemperatur-Anwendungen und hohe Energiedichten.

Weitere 40% könnten mit bereits oder bald verfügbaren Technologien elektrifiziert werden. Darin vor allem Nieder- und Mitteltemperatur-Anwendungen.

Etwa 1/3 des industriellen Energiebedarfs wird bereits über Strom gedeckt. Weit überwiegend Motoren, Beleuchtung, Kälte.

Fraunhofer ISI (2024)

Gelegenheitsfenster für Anlagenaustausch schließen sich



#	Application	Lifetime	End of life	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
1	Milk powder production	20	2040												
2	Paper drying	20	2040												
3	Steam supply chemical park	20	2040												
4	Continuous heating flat/long steel	35	2055												
5	Continuous heat treatment flat steel	35	2055												
6	Discontinuous heat treatment flat steel	35	2055												
7	Continuous melting cast iron (low capacity)	43	2063												
8	Continuous melting cast iron (medium capacity)	50	2070												
9	Continuous melting cast iron (high capacity)	47	2067												
10	Continuous melting aluminum	30	2050												
11	Discontinuous melting/holding semi-finished casting aluminum	30	2050												
12	Continuous homogenizing/heating aluminum strip/profiles	35	2055												
13	Discontinuous homogenizing/heating aluminum strip/profiles	30	2050												
14	Continuous heat treatment aluminum strip	30	2050												
15	Continuous melting copper continuous cast wire rod	50	2070												
16	Continuous heating semi-finished copper products for hot forming (low capacity)	20	2040												
17	Continuous heating copper semi-finished product for hot forming (high capacity)	48	2068												
18	Discontinuous heat treatment copper semi-finished product (low capacity)	35	2055												
19	Discontinuous heat treatment copper semi-finished product (high capacity)	35	2055												
20	Continuous heating of forged components	30	2050												
21	Discontinuous heating of forged components	30	2050												
22	Continuous heating of steel sheet blanks	30	2050												
23	Continuous carburizing (service provider)	30	2033												
24	Continuous carburizing (company store)	30	2033												
25	Discontinuous carburizing	30	2033												
26	Continuous melting container glass	15	2035												
27	Continuous melting flat glass	15	2035												
28	Continuous burning bricks	30	2050												
29	Continuous burning refractory bricks	30	2050												
30	Discontinuous burning refractory bricks	30	2050												
31	Continuous burning (low reactivity)	60	2080												
32	Continuous burning (medium/high reactivity)	45	2065												
33	Continuous burning (high throughput)	50	2070												
34	Continuous burning cement clinker	60	2080												

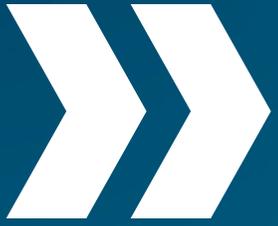
In 2020 ersetzte Anlagen werden nach 2045 noch betriebsbereit sein

- Diese Anlagen (**rot/schwarz** markiert) sind in der Kapitalbindung – dürfen aber nicht mehr emittieren.
- Das betrifft 92% der Hochtemperaturanwendungen.
- Glas und einige Dampftechnologien sehen kürzere Lebensdauern.
- Die Klimaziele erzeugen hier einen harten Schnitt.
- In einigen Fällen kann Nachrüstung die Veränderungen abmildern.

Was sind Handlungsoptionen?

- Produktion einstellen
 - Klimaziele verfehlen
 - Notwendigen schnelleren Austausch für Modernisierung nutzen
- } Sehr unattraktive Optionen

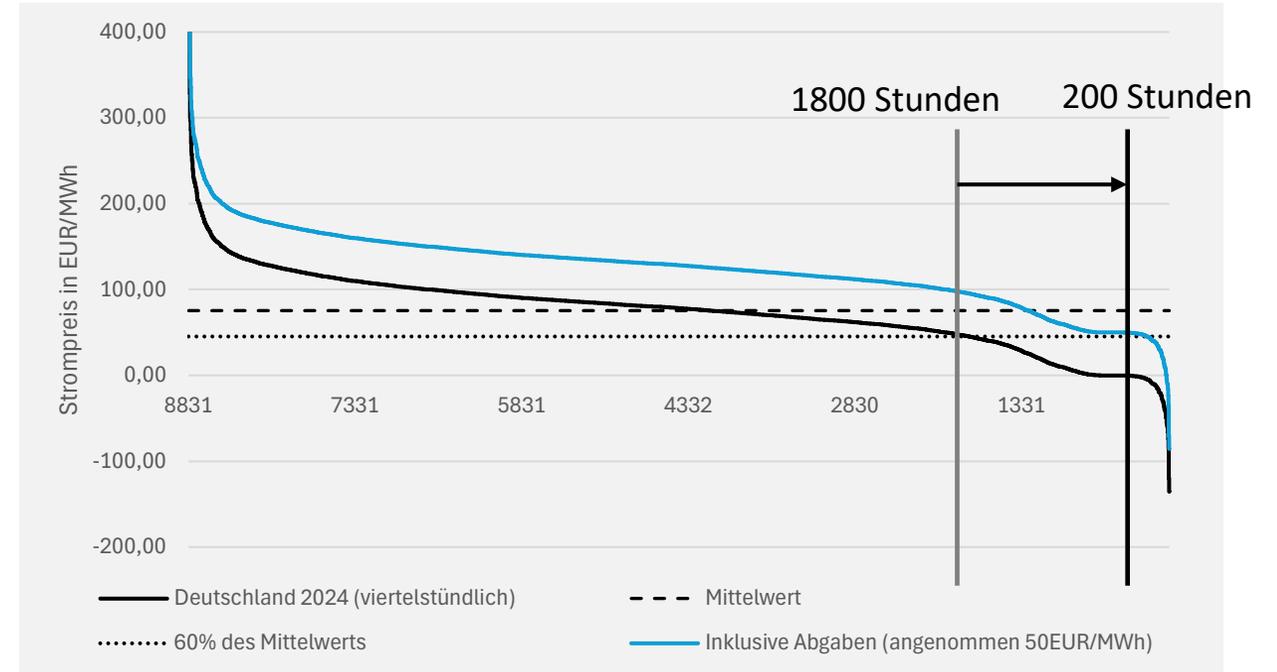
Was behindert die Elektrifizierung?



Ökonomische Situation der Elektrifizierung von Prozesswärme

Netzentgelte beeinflussen Niedrigpreisfenster für Flexibilisierung

- Netzentgelte sind individuell unterschiedlich, Angabe hier nur illustrativ.
- Grundsätzlich verschieben sie durch ihre unflexible Ausgestaltung Phasen niedriger Großhandelspreise.
- Aktuell kann nur bei reduzierten Netzentgelten/atypischer Netznutzung von relevanten Stundenanzahlen von flexibilisiertem Strombezug ausgegangen werden.



Vollelektrifizierung ist wirtschaftlich noch nicht attraktiv

Energiekosten sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit

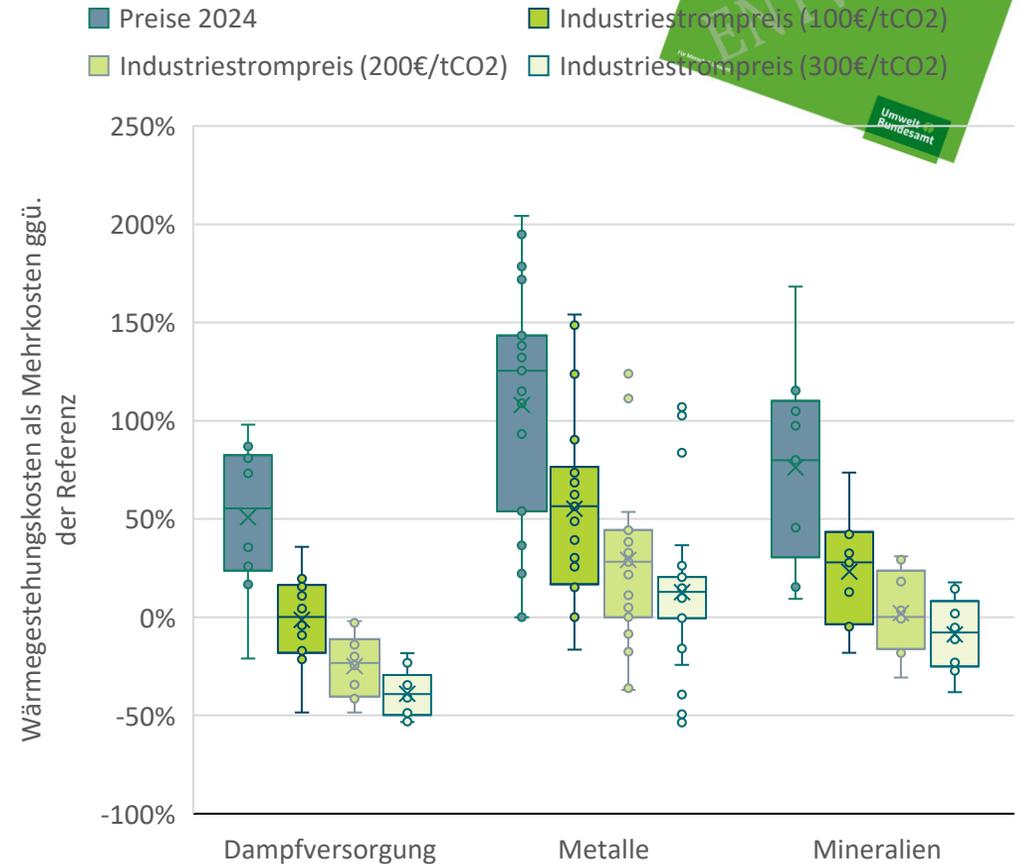
Annahmen:

	Strompreis (Band IF) EUR/MWh	Gaspreis (Band I5) EUR/MWh	CO2 Preis EUR/t
Preise 2024	138	40,8	75
Industriestrompreis (100€/tCO ₂)	76	31,32	100
Industriestrompreis (200€/tCO ₂)	76	31,32	200
Industriestrompreis (300€/tCO ₂)	76	31,32	300

- **Energiekosten sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit** (Kapital nur zwischen 5% -15% der Wärmegestehungskosten)
- Bei Annahme 2024er-Strom und Erdgaspreise und einem CO₂-Preis von 75 Euro/t CO₂ ist eine **Vollelektrifizierung** für die meisten Anwendungen **nicht wirtschaftlich**.
- Ein **wirtschaftlicher Betrieb** verlangt, dass der Strompreis auf ähnlichem Niveau wie der Erdgaspreis inkl. CO₂-Preis liegt, hohe **Effizienzgewinne** z.B. durch Wärmepumpen realisiert werden oder ein mit **flexiblem Betrieb** (Hybridanlage) **Niedrigpreisphasen** genutzt werden können.
- **Weiteres Hemmnis: Stromnetzanschlüsse am Standort** bei energieintensiven Unternehmen häufig nicht ausreichend für eine Vollelektrifizierung! Dadurch steigen Baukosten und entstehen lange Vorlaufzeiten.

*200 EUR/t CO₂-Preis bedeuten einen Preisanstieg für Erdgas von etwa 40 EUR/MWh.

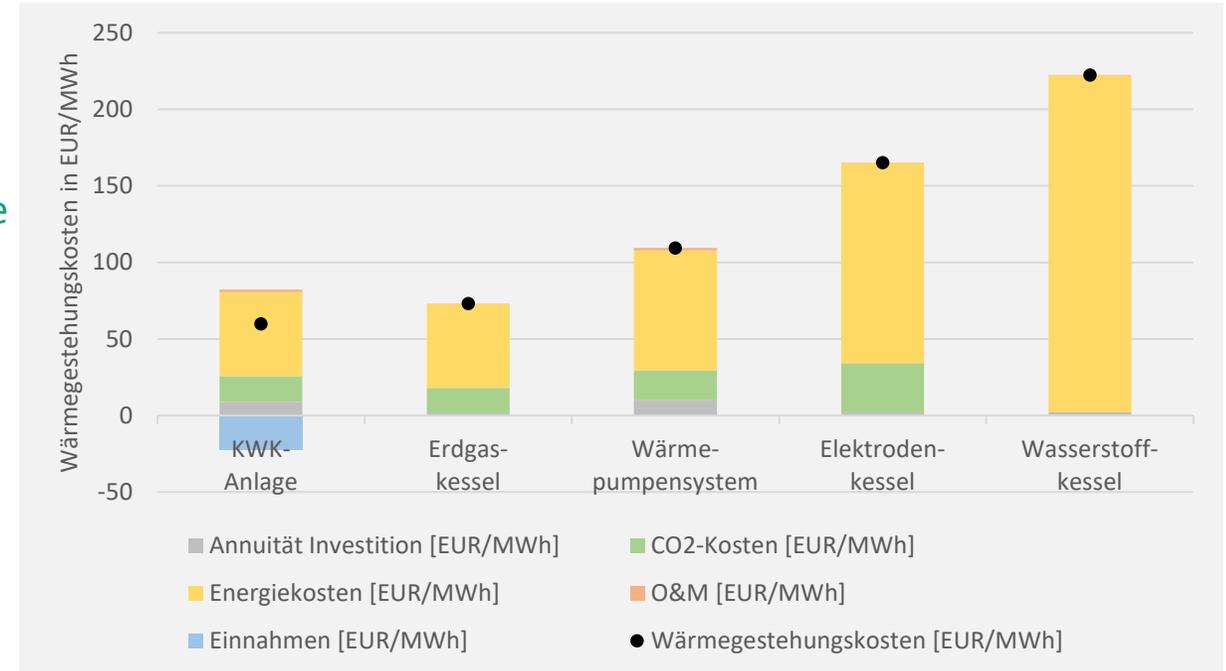
Wärmegestehungskosten (Mehrkosten ggü. fossiler Referenz)



Vollelektrifizierung ist wirtschaftlich immer noch nicht attraktiv

Beispielrechnung aus der Nahrungsmittelindustrie

- Referenztechnologie ist eine KWK-Anlage ($\sim 80\text{MW}_{\text{th}}$) mit geringfügiger Netzeinspeisung, hoher Eigenbedarfsdeckung. Überwiegend wärmegeführt.
- Energieträgerpreise und CO_2 -Preisüberwälzung erzeugen hohe Wärmegestehungskosten für Elektrifizierung.
 - Erdgas: 30 EUR/MWh
 - Strom: 115 EUR/MWh
 - Wasserstoff: 200 EUR/MWh
 - CO_2 : 75 EUR/t
- Wasserstoff ist vermutlich – hohe Unsicherheit beim Preis – nicht attraktiv.

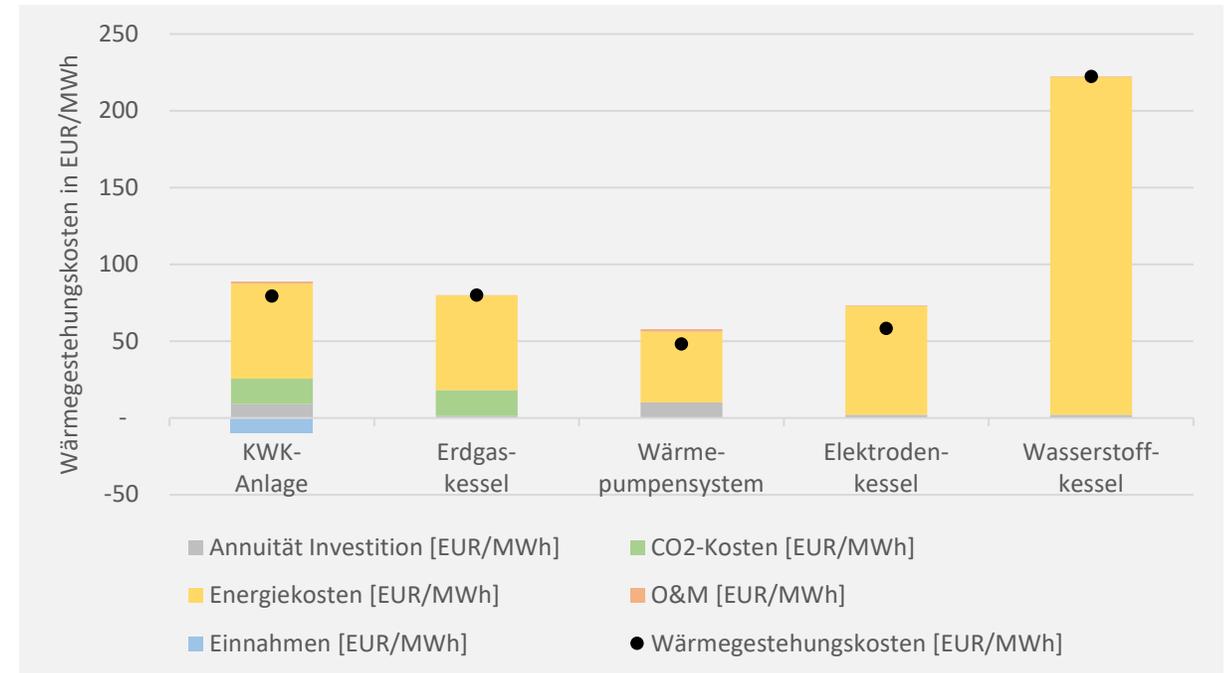


Geänderte Bedingungen verschieben das Ergebnis drastisch

Beispielrechnung aus der Nahrungsmittelindustrie

- **Strompreis um 75 EUR/MWh erlaubt konkurrenzfähige Elektrifizierungsoptionen.**
 - Weitgehende Netzentgeltentlastung
 - Flexible Nutzung von Niedrigpreisphasen
- **Diese Preise sind aber aktuell nicht realisierbar.**
 - Erdgas: 30 EUR/MWh
 - Strom: 75 EUR/MWh
 - Wasserstoff: 200 EUR/MWh
 - CO₂: 75 EUR/t
- **Wasserstoff ist vermutlich – hohe Unsicherheit beim Preis – nicht attraktiv.**

Politischer Handlungsbedarf

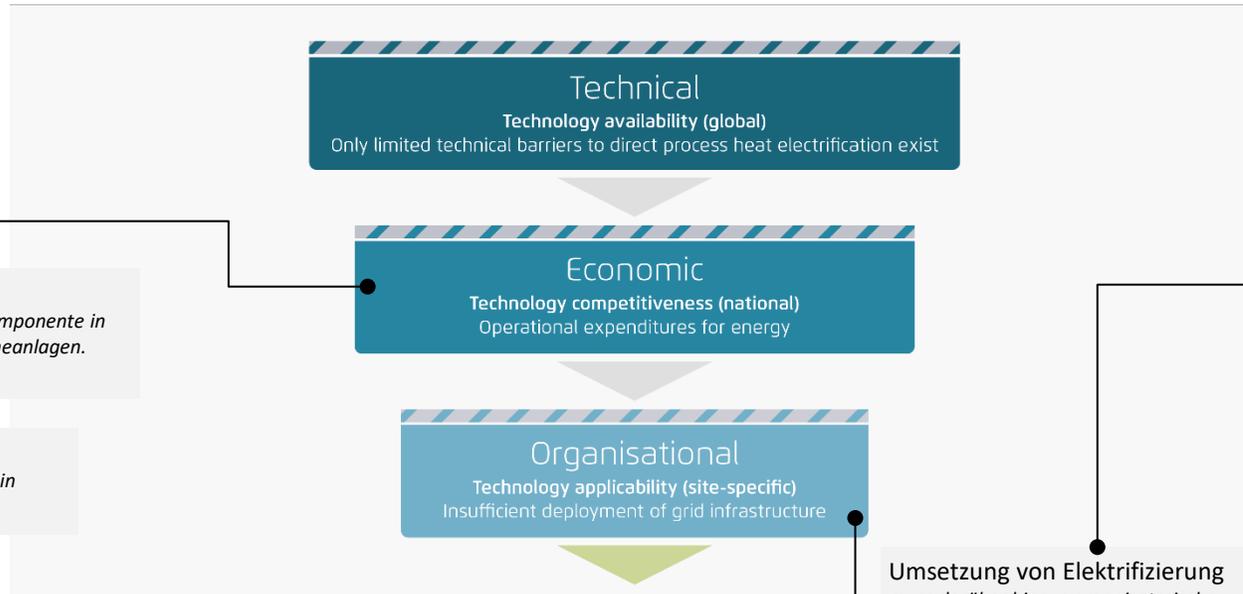


Es bestehen hohe ökonomische und organisatorische Hemmnisse



Dimensions and modes of action of barriers

→ Fig. 32



Fraunhofer ISI (2024)

OPEX
für Energie sind die größte Kostenkomponente in den Gesamtkosten von Prozesswärmanlagen.

Energieeffizienzvorteile
können die höheren Preise von Strom in einigen Fällen ausgleichen.

Niedrigere Strompreise
werden aber in einer Vielzahl von Anwendungen notwendig sein, um Elektrifizierung wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Hemmnisse sind handgemacht – und daher beeinflussbar.

Umsetzung von Elektrifizierung
muss darüber hinaus organisatorische Hemmnisse überwinden:

- Strominfrastrukturausbau
- Produktionssysteme vor Ort
- Lebensdauern von Bestandsanlagen
- Kenntnisse über Lösungen
- Unsicherheiten

Produktionssysteme
vor Ort müssen auf Elektrifizierung umgestellt werden. Das kann (neben den reinen Investitionen) starke Herausforderungen in Planung und Umsetzung erzeugen (Vermeidung Produktionsstillstand).

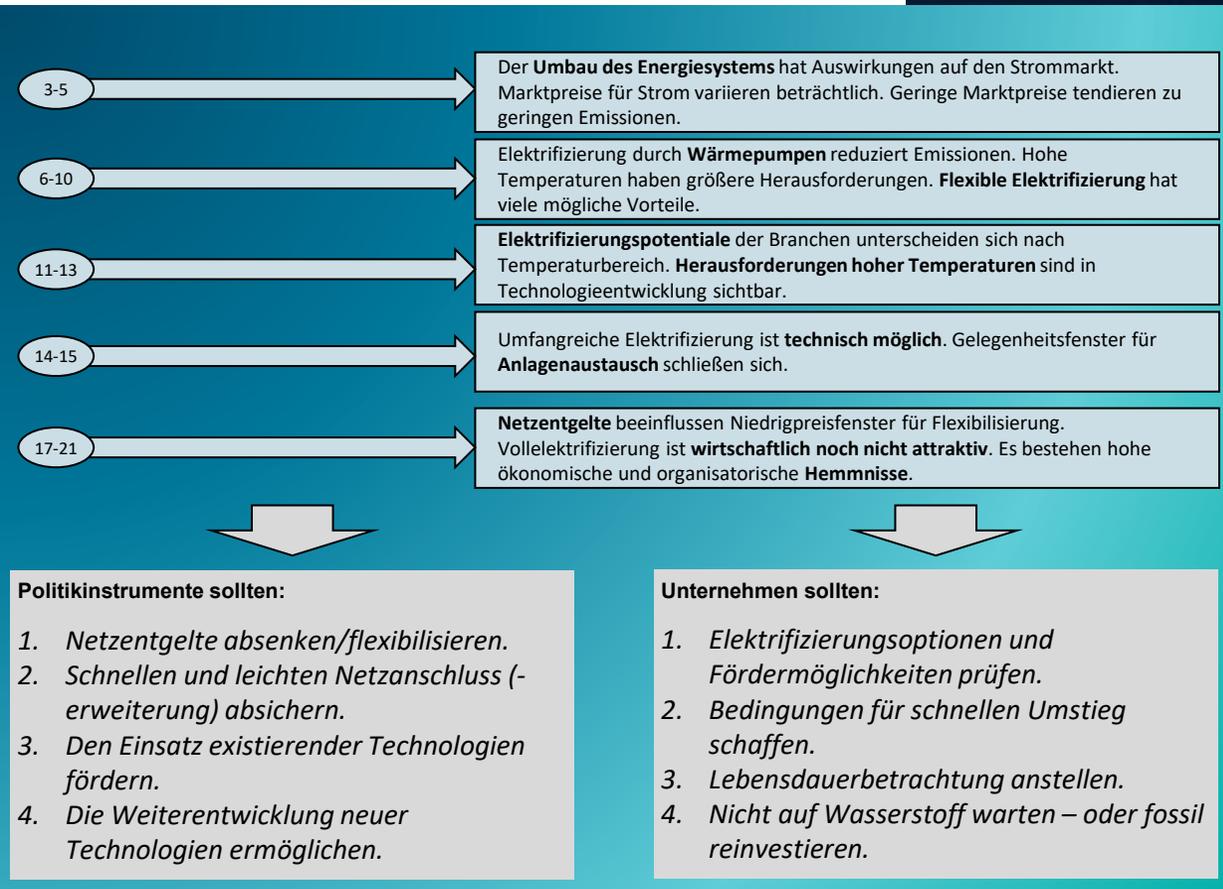
Strominfrastruktur
muss ausgebaut werden. Das betrifft neben Übertragungs- und Verteilnetzen den direkten und schnellen Anschluss der Industriestandorte.

Lebensdauer
von Bestandsanlagen ist üblicherweise sehr hoch. Viele müssen vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauer ausgetauscht werden, wenn Klimaziele erreicht werden sollen.

Kenntnisse
über bereits verfügbare Technologien kann manchmal fehlen.

Unsicherheit
z.B. über die Verlässlichkeit politischer Maßnahmen und die allgemeine Entwicklung verhindern oder verzögern Transformationsbemühungen.

Flexibilisierung in der Industrie - Warum und wie wandeln sich Unternehmen?



Kontakt



<http://www.forecast-model.eu/forecast-en/index.php>

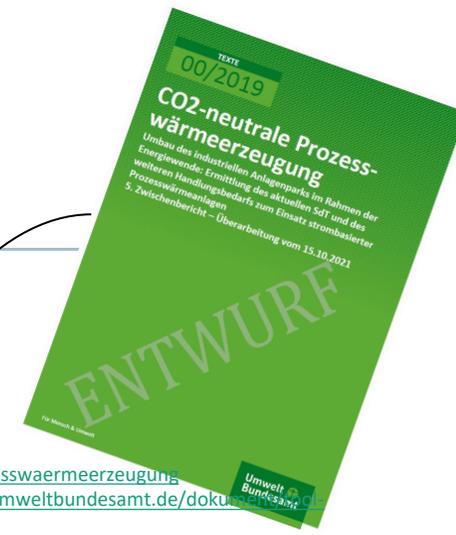
Name: Matthias Rehfeldt

Abteilung: CCE, Geschäftsfeld Nachfrageanalysen und -projektionen

Telefon: +49 721 6809-412

E-Mail: matthias.rehfeldt@isi.fraunhofer.de

Fragen?



Verweise auf Projekte und Veröffentlichungen

- **CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung (UBA)**
 - Studie: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>
 - Tool zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit (Excel mit Makros): <https://www.umweltbundesamt.de/dokumentation/wirtschaftlichkeit-zur-berechnung-der-wirtschaftlichkeit-der>
- **Langfristszenarien (BMWK)**
 - Präsentationen/Berichte/Webinare: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>
 - Online-tool mit interaktiven Grafiken: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/>
- **Nationale Projektionsberichte (UBA)**
 - 2023: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland>
 - 2024: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technischer-anhang-der-treibhausgas-projektionen>
 - Frühere Versionen: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-fuer-die-klimaschutz-energiepolitik/integrierte-energie-treibhausgasprojektionen>
- **Projektionsbericht Baden-Württemberg (LUBW)**
 - <https://irees.de/2024/02/06/klimaschutz-und-projektionsbericht-baden-wuerttemberg/>
- **Ariadne (BMBF)**
 - Sammlung der Veröffentlichungen: <https://ariadneprojekt.de/publikationen/>
 - Report zur Klimaneutralität: <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>
 - Ausgewählte Veröffentlichungen zu Wasserstoff:
 - <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-systementwicklung-wasserstoff-infrastrukturplanung-und-der-geltende-rechtsrahmen/>
 - <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-aus-der-gaskrise/>
 - <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-wasserstoff-und-die-energiekrise-funf-knackpunkte/>
 - <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-wasserstoffimportsicherheit-fuer-deutschland-zeitliche-entwicklung-risiken-und-strategien-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet/>
 - <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfahigen-wasserstoffstrategie/>
- **Agora Industrie**
 - Direktelektrifizierung: https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2023/2023-20_IND_Electrification_Industrial_Heat/A-IND_329_04_Electrification_Industrial_Heat_WEB.pdf



Beispiele aus der Praxis:
**Analyse und Anpassung von
Prozessen an Preissignale**

Martin Seidler

Head of Research, ifesca GmbH

Wird nachgereicht