



Stromverbrauchsmodellierung des Industriesektors im Kontext der Dekarbonisierung

Fabian Jetter, Stefan Schmidt, Kirstin Ganz, Ryan Harper,
Andrej Guminski

27.07.2022

Abschlussbericht

Inhaltsverzeichnis

1

Zielsetzung und Vorgehensweise

2

Status quo (Industriesteckbriefe)

3

Transformationspfade der deutschen Industrie

4

Lastprofile & maximale Anschlussleistung

5

Regionalisierung des Status quo

6

Regionalisierung der industriellen Transformationspfade

7

Literaturverzeichnis

Abschlussbericht

Erläuterung

Im nachfolgenden Bericht werden Vorgehensweise und Ergebnisse des Projekts „Stromverbrauchsmodellierung des Industriesektors im Kontext der Dekarbonisierung“ beschrieben und visualisiert.

Zunächst erfolgen die Erläuterung der Aufgabenstellung, eine Zusammenfassung der geleisteten Arbeiten sowie ein Überblick zur Vorgehensweise (Kapitel 1). In Kapitel 2 erfolgt die Beschreibung der Prozessauswahl sowie die Darstellung des Status quo je Prozess in Industriesteckbriefen. Aufbauend darauf werden die Methodik sowie die Beschreibung der Ergebnisse für die Transformationspfade der Industrieszenarien „max. Strom“ und „max. H₂“ auf Deutschlandebene (Kapitel 3) beschrieben. Der Fokus der Ergebnisse liegt auf den Strom-, Wasserstoff- und -derivateverbräuchen. In Kapitel 4 wurde gezeigt, wie Branchenlastprofile erstellt und daraus wiederum die Methodik zur Berechnung der Anschlussleistung je Landkreis ermittelt wurde. In Kapitel 5 wird die Regionalisierung des Status-quo-Stromverbrauchs erklärt und das Ergebnis gezeigt. Dieser Abschnitt liefert die methodische Grundlage für Kapitel 6, in dem die Methodik und die Ergebnisse der Regionalisierung auf Landkreisebene vorgestellt werden. Kapitel 7 listet Referenzen auf.

1. Zielsetzung und Vorgehensweise



Zielsetzung und Arbeitsschritte



Zielsetzung

Kernziel des Vorhabens war es, eine Regionalisierungsmethodik für heutige und zukünftige industrielle Strom-, H₂- und -derivateverbräuche zu entwickeln, und diese auf zwei Szenarien anzuwenden. Ein weiteres Ziel war die Wissensvermittlung zu Datengrundlage, Methodik und Industrietransformation im Allgemeinen. Darüber hinaus sollte der Datensatz mit den endgültigen Ergebnissen an die vier Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz, Amprion, Tennet und TransnetBW übergeben sowie eine Abschlussdokumentation erstellt werden.

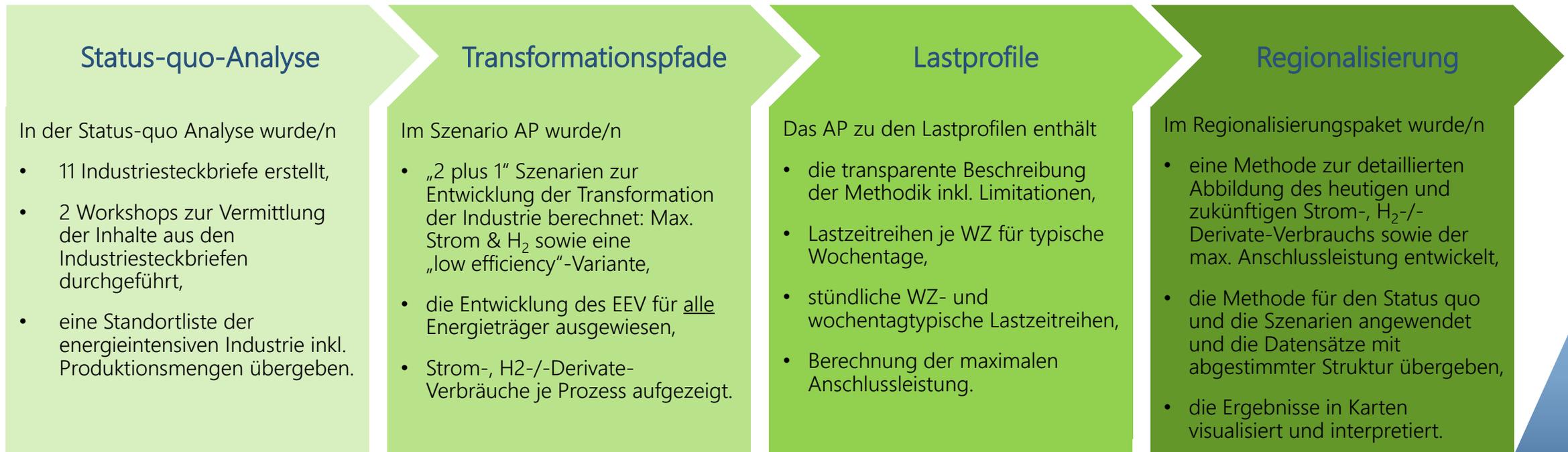


Übersicht zu den Tätigkeiten und Deliverables je Arbeitsschritt

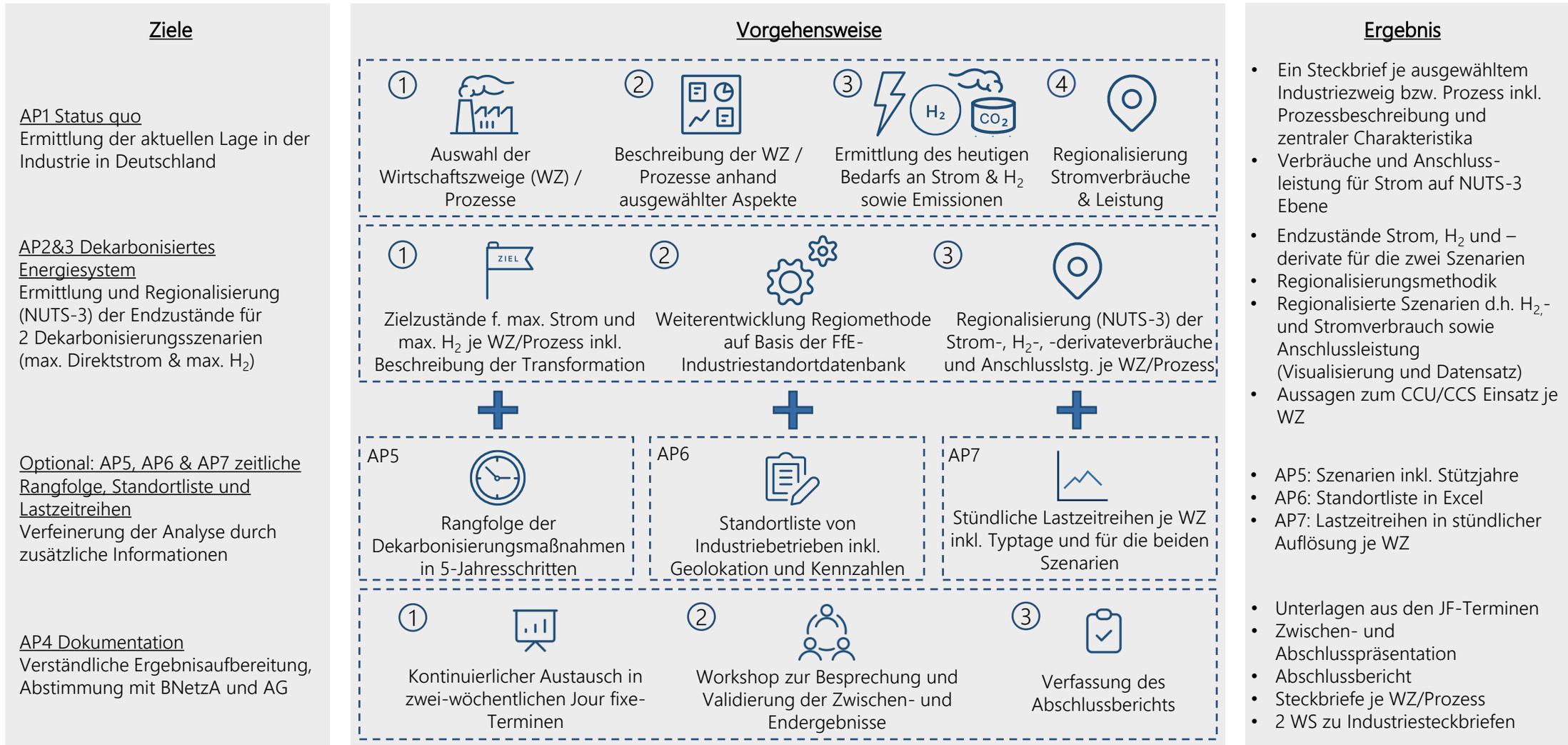


Kernergebnis

Kernergebnis der Arbeiten im Projekt „Stromverbrauchsmodellierung des Industriesektors im Kontext der Dekarbonisierung“ ist der auf dem gemeinsamen Sharepoint abgelegte Datensatz. Dieser enthält die industriellen Strom-, H₂- und -derivateverbräuche sowie die Anschlussleistung je Landkreis in Deutschland für jedes Stützjahr für **3 Szenarien**. Der kontinuierliche Austausch und Wissenstransfer zu Daten, Methoden und Inhalten wurde u.a. über die 6 Jour Fixe-Termine sichergestellt.



Die Ziele je Arbeitspaket, detaillierte Vorgehensweise je AP und das Ergebnis in der Zusammenfassung



Übersicht zu Eingangsdaten und Ergebnissen für den Kern der Projektarbeit – Status quo-Analyse, Mantelzahlen, Regionalisierung

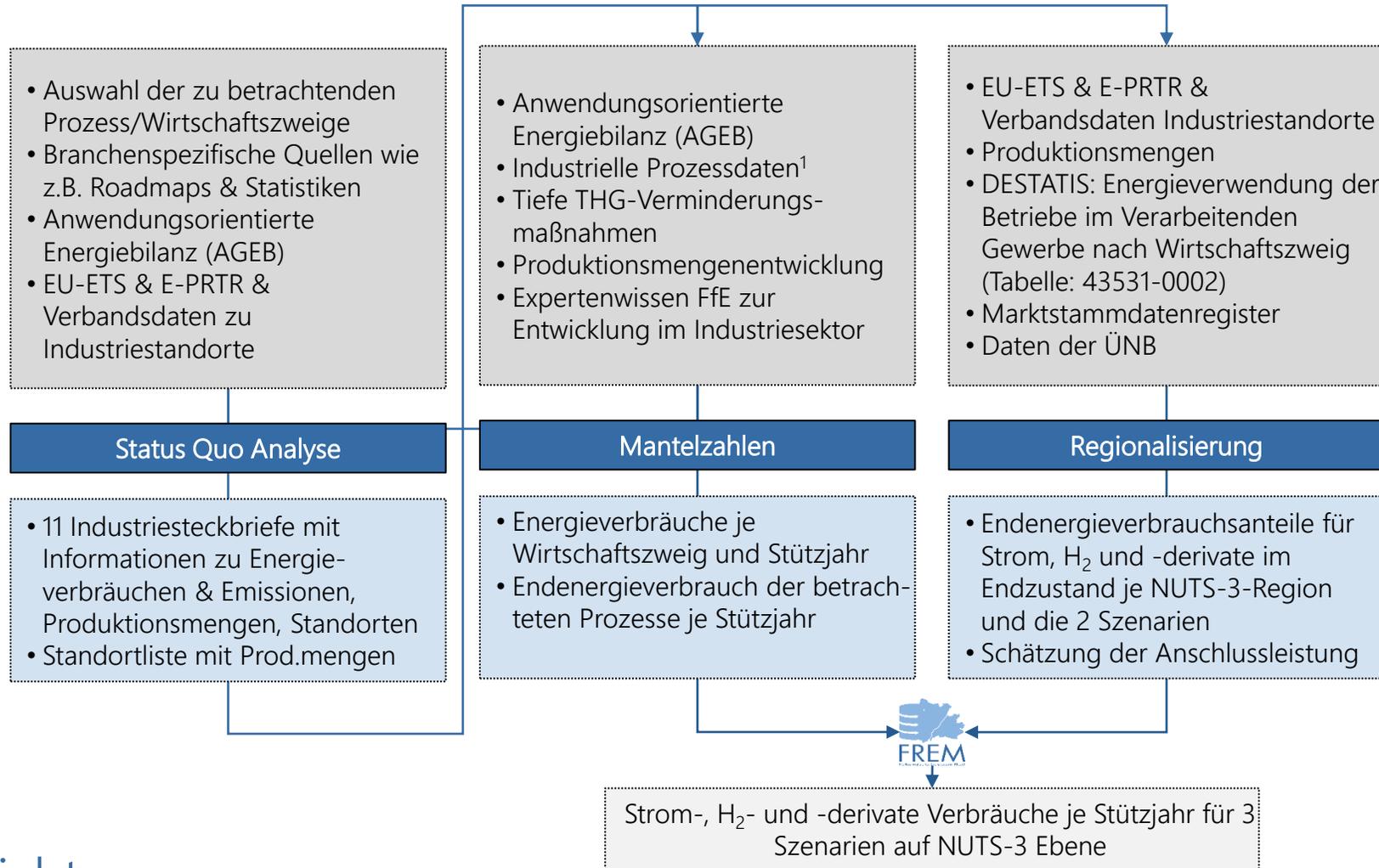
Legende:

Eingangsdaten

Modul

Ergebnis

¹Produktionsmengen*;
 Technologielebensdauer;
 Energieträgeranteile*; Spez.
 Brennstoff-, Strom- und
 Rohstoffverbrauch*;
 Spezifische
 Prozessemissionen*;
 Anwendungen je Prozess,
 Anwendungsfaktor;
 Lebensdauer der
 Technologie



2. Status quo

Industriesteckbriefe



Transformationspfade der deutschen Industrie



Ziel der Status quo-Analyse ist es, einen Überblick zum Industriesektor zu erlangen und diesen zu vermitteln. Hierzu zählen aktuelle Daten, Prozessabläufe und –standorte, aber auch die wichtigsten Maßnahmen zur Treibhausgasverminderung. Die Ergebnisse der Literatur- und Statistikkrecherche werden in Industriesteckbriefen und einer Standortliste zusammengefasst. Die Vorgehensweise und auch die Inhalte wurden in Jour fixe-Terminen sowie separaten Steckbrief-Workshops vermittelt. Darüber hinaus wird eine kurze Einschätzung zum Einsatz von Carbon Capture and Storage/Utilization je Prozess gegeben und auf weitere Literatur verwiesen.

Schritt 1 der Kurzstudie war die Auswahl der wichtigsten Prozesse der energieintensiven Wirtschaftszweige

Vorgehensweise

Aufgrund der Heterogenität des Industriesektors konnte im Rahmen der Kurzstudie nur eine begrenzte Auswahl energieintensiver Prozesse betrachtet werden. Da das Ziel der Studie die Abbildung der heutigen und zukünftigen Strom-, H₂- und -derivateverbräuche ist, wurden hierfür die wichtigsten Prozesse aus den energieintensivsten Wirtschaftszweigen ausgewählt (s. Tabelle rechts). Für diese Prozesse wurde im Anschluss jeweils ein Industriesteckbrief erstellt. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Szenariobildung für diese Prozesse (mit Ausnahme der Raffinerien) tiefe Treibhausgasverminderungsmaßnahmen explizit modelliert und in den Ergebnissen ausgewiesen.

Trotz der Begrenzung der Detailanalyse auf die ausgewählten Prozesse wurde im Rahmen der Kurzstudie der gesamte Endenergieverbrauch der Industrie sowie der Verbrauch im Umwandlungssektor berücksichtigt. Das bedeutet, dass auch der nicht im Detail analysierte Endenergieverbrauch in den Berechnungen berücksichtigt wird und dieses mittels vereinfachter Transformationslogiken adressiert wird. Ein Großteil dieser nicht explizit betrachteten Endenergieverbräuche liegt im Bereich der Nieder- und Mitteltemperaturprozesswärme, bei der ein solches Verfahren in der Industriemodellierung nicht unüblich ist. Um dennoch gewisse Anhaltspunkte über diesen Teil des Verbrauchs zu vermitteln, wurde ein Industriesteckbrief zur „Sonstigen Industrie“ inkludiert.

Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber wurde für alle verwendeten Daten im Vorhaben das Basisjahr 2018 gewählt. Im Rahmen des Status quo-Paketes wurde zudem eine Standortliste inkl. Produktionsmengen erstellt. Dies wird im Abschnitt Regionalisierung Status quo beschrieben.

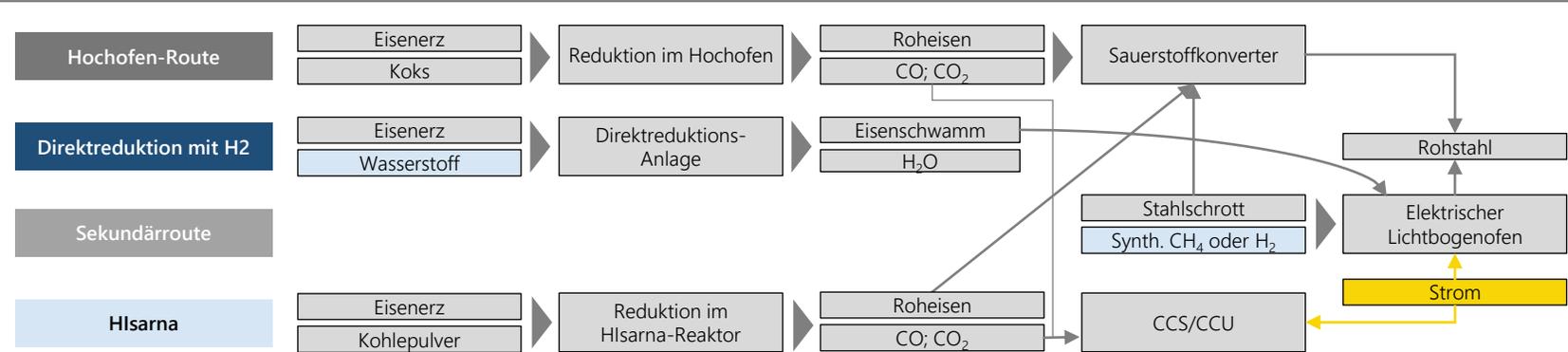
Untersuchte Prozesse

Industriezweig	Prozesse	WZ-Klassifikation
Eisen- und Stahl	Primär- & Sekundärstahl	24.1, 24.2, 24.3
Chemie	High Value Chemicals	20.1
	Ammoniak	
	Methanol	
Nicht-Eisen-Metalle	Aluminium	24.42
	Kupfer	24.44
Verarbeitung von Steinen und Erden	Zement & Kalk	23.5, 23.6
	Hohlglas & Flachglas	23.1, 23.2, 23.3
Papiergewerbe	Papiermaschinen	17.2
	Holz- und Zellstoffproduktion	17.1
Sonstige*	NT-Prozesswärme	10, 11, 12, 20 (außer 20.1), 21, 22
Raffinerien	Raffinerieprozesse	19

Industriesteckbriefe für alle ausgewählten Prozesse

Prozessbeschreibung der Status quo Technologien

- Primärstahlherstellung - Hochofen-Route:** Im ersten Schritt wird der Sauerstoff aus dem Eisenerz entfernt. Hierfür wird eine Mischung aus hauptsächlich Eisenerz und Koks in den Hochofen gegeben und unter Zugabe von Heißluft erhitzt (ca. 1.300 °C). Der im Koks enthaltene Kohlenstoff wird hierdurch vergast und reagiert zu Kohlenstoffmonoxid (CO). Dieses Reduktionsgas reduziert den im Eisenerz enthaltene Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid (CO₂). Das so reduzierte Eisen schmilzt bei den während des Prozesses entstehenden Temperaturen von bis zu 2.200 °C zu flüssigem Roheisen und wird am Boden des Ofens abgestochen. Für die Festigkeit wird anschließend im Konverter Sauerstoff mit einer Lanze in das flüssige Roheisen geblasen, um den Kohlenstoffgehalt weiter zu senken – unter 2 % wird das Metall als Rohstahl bezeichnet und kann vom Konverter in einer Stahlpfanne abgestochen werden.
- Sekundärstahl - Stahlrecycling im Lichtbogenofen:** Stahlschrott wird in einen Lichtbogenofen gegeben, der mit einem Deckel dann verschlossen wird. Auf der Unterseite des Deckels befinden sich leitfähige Graphitelektroden, die bei der Durchleitung von Strom einen Lichtbogen zwischen den Elektroden und dem Stahlschrott erzeugen. Für das Entstehen von Temperaturen bis zu 3.500 °C im Lichtbogen sind hohe Spannungen und Stromstärken im kV- bzw. kA-Bereich notwendig. Die thermische Energie des Lichtbogens wird an den Stahlschrott weitergegeben, der beim Einschmelzen Temperaturen bis 1.800 °C erreicht.



Prozessbeschreibung der Transformationspfade

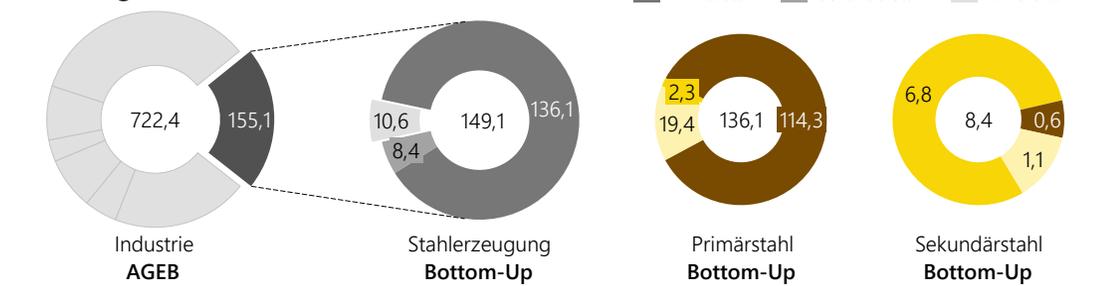
- Substitution der Hochofen- durch die Direktreduktionsroute:** Die Verbrennung von Koks oder Kohle zur Reduktion von Eisenerz zu Roheisen im Hochofen wird durch die H₂-basierte Direktreduktion von Eisenerz zu Eisenschwamm ersetzt. Hierbei entsteht H₂O statt CO₂ in dem Reduktionsverfahren. Der Eisenschwamm wird anschließend im elektrischen Lichtbogenofen (EAF) zu Stahl eingeschmolzen.
- Substitution Primär- für Sekundärstahl:** Vermehrte Verwendung von Sekundärstahl anstelle von Primärstahl würde die benötigten Energiemengen senken und verstärkt auf elektrische Energie verlagern. Dies setzt eine verstärkte Kreislaufwirtschaft voraus. Eine komplette Umstellung auf Recyclingstahl ist nicht möglich.
- Hlsarna:** In einem speziellen Reaktor werden Eisenerz und Kohlepulver zu Roheisen reduziert. Dabei entsteht ein besonders reiner CO₂-Abgasstrom, der daher für CCS/U gut geeignet ist. Vorgelagerte Schritte der Hochofenroute (z.B. Sintern) sind mit dem entwickelten Reaktor nicht nötig. Nach Information des Branchenverbandes reduziert sich aktuell das Interesse an dem Prozess.

Stahlstandorte

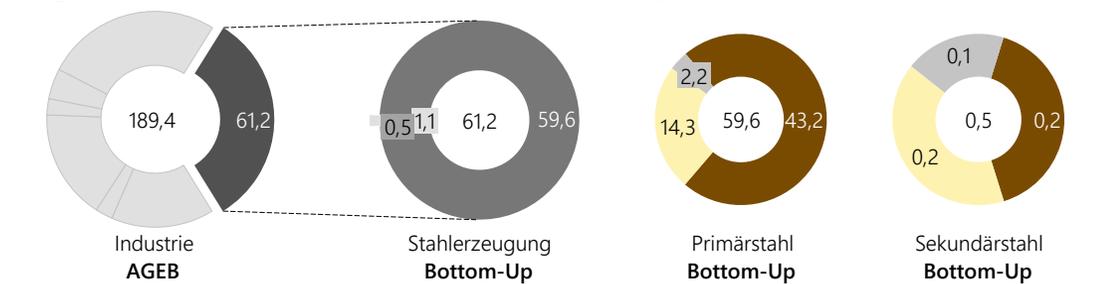


Primärstahl: **9 Standorte**
 Sekundärstahl: **18 Standorte**
 WZ-Klassifikation: **24.1**

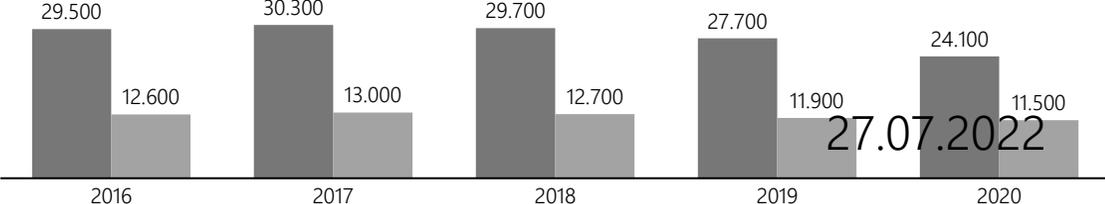
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



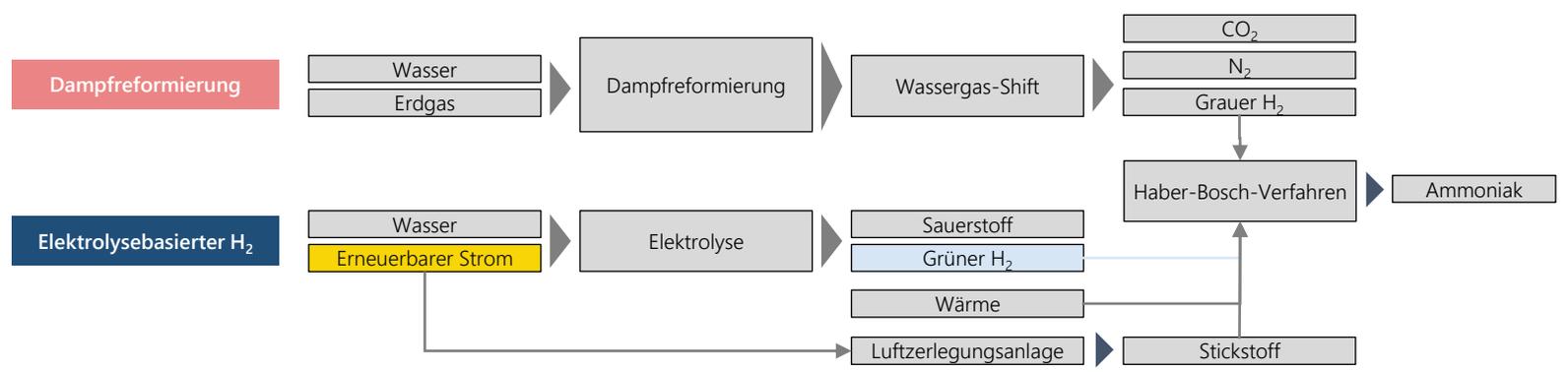
Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

Prozessbeschreibung der Status quo Technologien

- Ammoniak-Synthese:** Ammoniak wird im Haber-Bosch-Verfahren aus Wasserstoff und Stickstoff synthetisiert. Als Ausgangsprodukte dienen Erdgas, Wasserdampf und Luft (Stickstoff-Sauerstoffgemisch), welche mit Hilfe des Dampfreformers in Wasserstoff und Stickstoff sowie Wasser und Kohlendioxid zerlegt werden. Dabei wird das Feedgas im Primärreformer mit Dampf gemischt und etwa 60% des Erdgases in einer endothermen Reaktion zu Synthesegas umgeformt. Der Stickstoff wird in einem Sekundärreformer durch weitere Verbrennung von Erdgas vom Luftsauerstoff getrennt. Das im Prozessgas verbleibende Kohlenmonoxid wird mit Hilfe einer Wassergas-Shift-Reaktion in Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Die eigentliche Synthese des Ammoniaks geschieht anschließend unter hohem Druck (150-350 bar) und bei hoher Temperatur (450-550 °C) in einem Reaktor. Zur Beschleunigung der Reaktion wird Eisen als Katalysator eingesetzt. Das entstandene Reaktionsgas kondensiert anschließend durch einen Wärmetauscher zu flüssigem Ammoniak.



Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- Substitution der Dampfreformation:** Die Reformierung von Erdgas und deren Ausgangsprodukte kann durch klimaneutralen Wasserstoff und Stickstoff aus einer Luftzerlegungsanlage ersetzt werden. Das bei der Luftzerlegung eingesetzte Linde-Verfahren beruht auf dem Joule-Thomson-Effekt. Durch starke Komprimierung der Umgebungsluft erwärmt sich das Gasgemisch und wird über Filteranlagen in ein Stickstoff-Sauerstoff-Gemisch gewandelt. Die verbliebene Wärmeenergie wird mit Hilfe eines Wärmetauschers entzogen und anschließend das Gasgemisch wieder entspannt. Dabei verringert sich die Temperatur so stark, dass sich das Gemisch verflüssigt. Durch die unterschiedlichen Siedepunkte geht Stickstoff früher in die gasförmige Phase über und kann abgeleitet werden. Für die anschließende Ammoniaksynthese fehlt der konventionelle Dampf (Wärmeenergie) aus der Dampfreformierung, somit muss der Prozess zusätzlich mit Wärme versorgt werden.
- Weitere Prozesse:** Biologische Fixierung, elektrochemische Produktion und chemische Kreislaufprozesse könnten im Zukunft auch Ammoniak bereitstellen. Diese Routen befinden sich erst im TRL-Bereich 1-2.

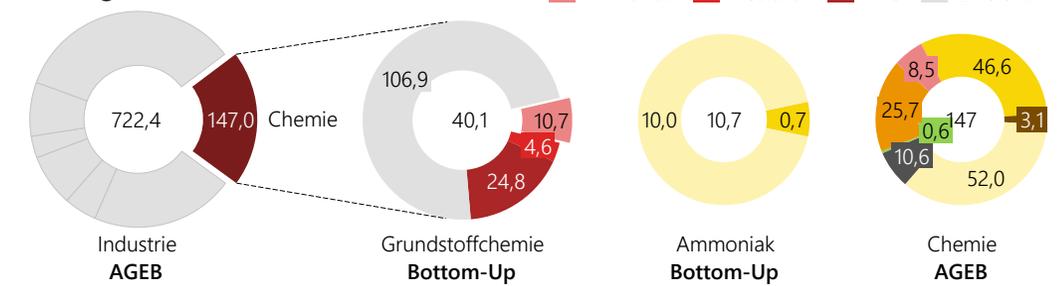
Produktionsstandorte



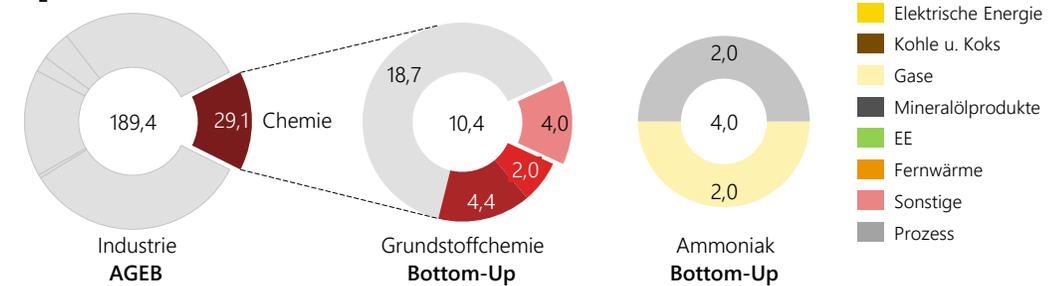
Ammoniak: **5 Standorte**

WZ-Klassifikation: **20.1**

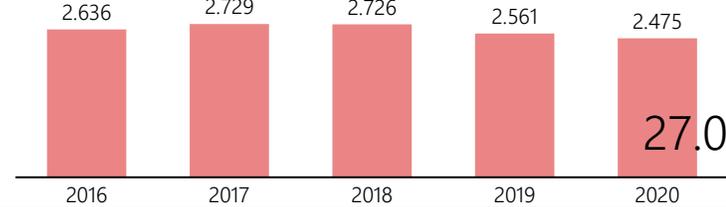
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



Produktionsmenge [kt]

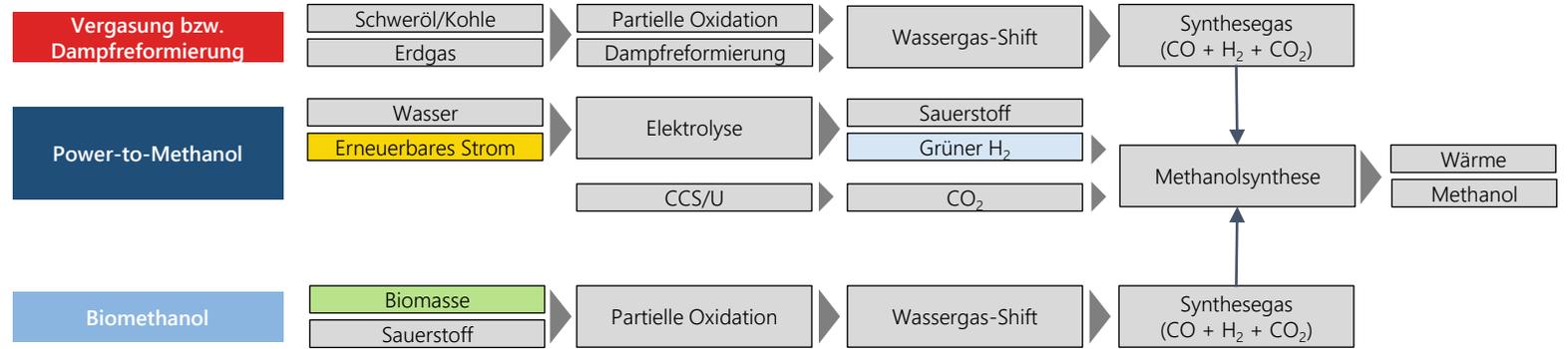


27.07.2022

* Die Differenz enthält neben dem Delta zwischen AGE und Bottom-Up-Berechnung auch die sonstigen WZ der Chemie, welche für Regionalisierung nicht explizit transformationsrelevant sind. Dennoch werden sie im Bereich NT-Prozesswärme mitbetrachtet (s. NT-Prozesswärme).

Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

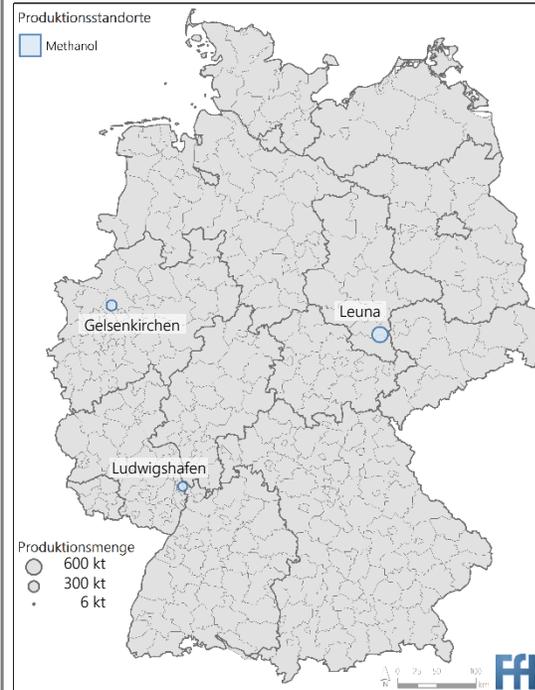
- Methanolsynthese:** Die Synthese von Methanol benötigt als Ausgangsstoff Synthesegas, welches konventionell durch Partielle Oxidation oder Dampfreformierung gewonnen wird. Bei der Partiiellen Oxidation werden Kohlenwasserstoffe (Schweröl) oder Kohlenstoff in Form von Kohle (Kohlevergasung) unterstöchiometrisch verbrannt. Die Dampfreformierung verwendet hingegen Erdgas. Der Prozess wurde bereits detaillierter bei der Ammoniakherstellung beschrieben. Nach beiden Prozessen muss der Anteil von Kohlenmonoxid für den nachgelagerten Syntheseprozess durch die Wassergas-Shift-Reaktion reduziert werden. Hierbei reagiert bei hoher Temperatur (die Temperatur bestimmt dabei den Anteil) das Kohlenmonoxid im Gasmisch mit Wasserdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Die eigentliche Methanolsynthese läuft im heutigen industriellen Maßstab im LURGI-Verfahren ab. Dabei reagiert mit Hilfe eines Kupferoxid-Katalysators das Synthesegas unter Druck (50-100 bar) und bei einer Temperatur von 200-300 °C mit sich selbst in einer exothermen Reaktion zu Methanol und weiteren Bestandteilen. Um den Anteil des Methanols möglichst hoch zu halten, wird das Reaktionsgas in einem zweiten Reaktor durch frisches Synthesegas gekühlt. Dabei scheidet sich Methanol ab und das Restgas + das Synthesegas werden wiederum in den ersten Reaktor zurückgespeist. Im letzten Schritt wird durch Abkühlung des Rohmethanols das Methanol destilliert und von den übrigen Bestandteilen getrennt.



Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- Power-to-Methanol:** Der eigentliche Syntheseprozess wird auch in Zukunft Bestand haben. Mögliche Verbesserungen der Katalysatoren zur effizienteren Ausnutzung des Synthesegases können dabei nicht ausgeschlossen werden. Jedoch kann das Synthesegas wie bereits bei der Ammoniakherstellung durch Wasserstoff ersetzt werden. Im Gegensatz dazu muss bei der Methanolherstellung eine zusätzliche CO₂-Quelle verwendet werden. Dies können in Zukunft CCU- oder CCS-Technologien (ausgenommen irreversibel gespeichertes CO₂) sein.
- Biomethanol:** Wie bei der konventionellen Herstellung von Synthesegas aus Kohle wird durch Partielle Oxidation (Vergasung) die Biomasse in die entsprechenden Bestandteile zerlegt und über die Wassergas-Shift-Reaktion in das optimale Verhältnis gebracht. Durch die Ähnlichkeit der Prozesse, kann in Zukunft durch einen geringen technologischen Aufwand die Kohlevergasung auf Biomasse umgestellt werden.

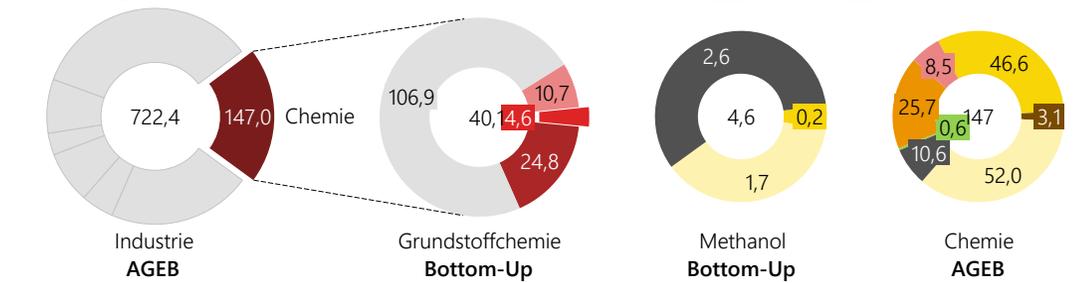
Produktionsstandorte



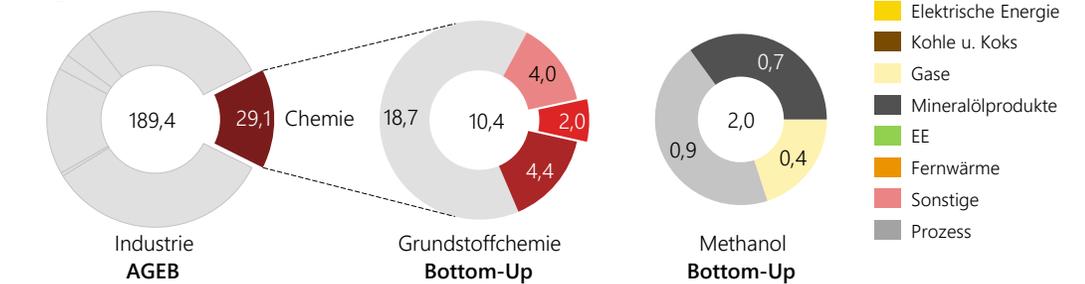
Methanol: **3 Standorte**

WZ-Klassifikation: **20.1**

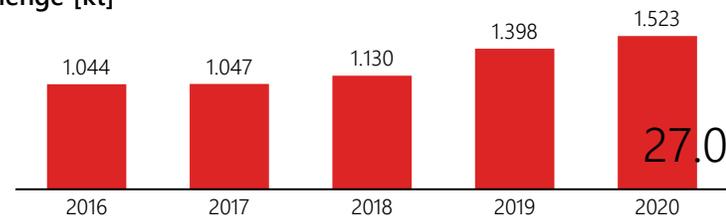
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



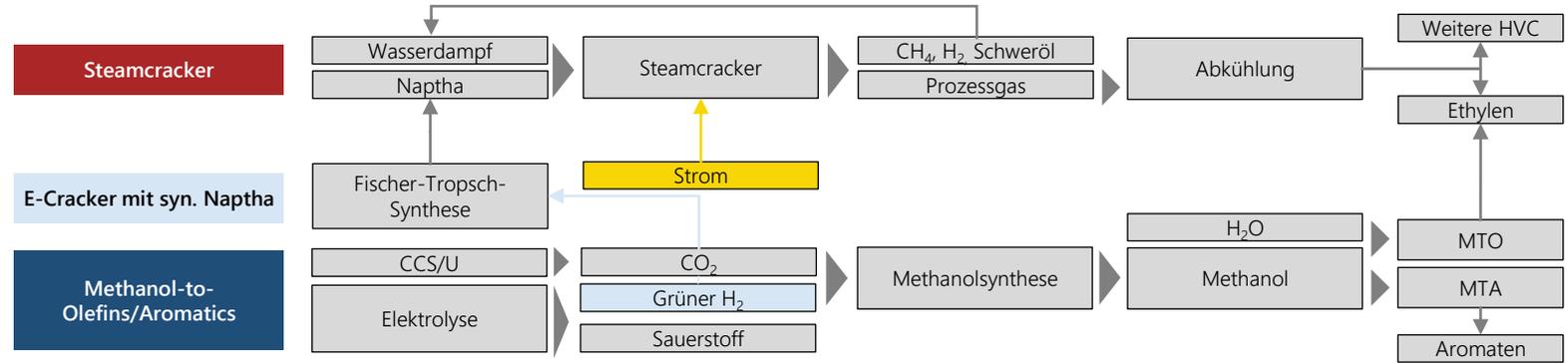
Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

Prozessbeschreibung der Status quo Technologien

- Steamcracker:** Als Edukt für die Produktion von Olefinen und Aromaten wird im konventionellen Bereich fast ausschließlich Naphta als Nebenprodukt der Erdölraffinerie verwendet. Dieses wird mit Hilfe von Wasserdampf und hohen Temperaturen (bis zu 900 °C) im Steamcracker zu kurzketigen Kohlenwasserstoffketten gewandelt. Dabei entstehen neben dem Prozessgas auch Methan, Wasserstoff und Schweröl, welche zur Befuerung des Steamcrackers genutzt werden. Durch Abkühlung des Prozessgases kondensieren die Olefine und Aromate, wie z.B. Ethylen, Propylen und Buten, bei unterschiedlichen Temperaturen aus und können getrennt weiterverarbeitet werden. Typische Abnehmer sind z.B. die Kunststoffindustrie zur Herstellung von Polyethylen.



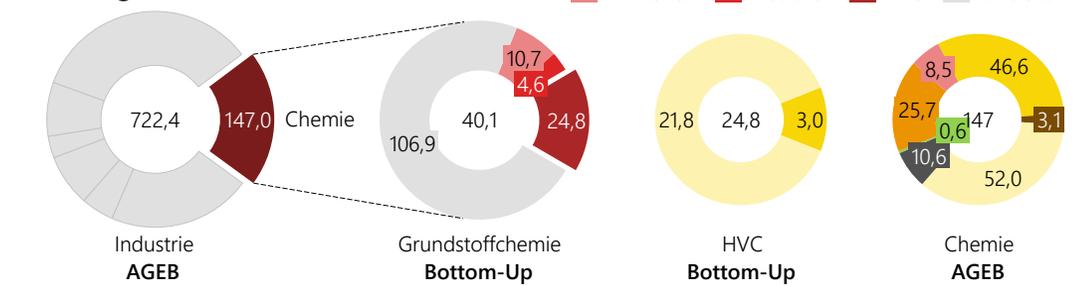
Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- Synthetisches Naphta:** Naphta wird bisher aus Erdöl gewonnen, könnte allerdings in Zukunft durch die Fischer-Tropsch-Synthese aus Synthesegas, welches über die Wasserelektrolyse und Kohlendioxid bereitgestellt werden kann, erzeugt werden. Der Steamcracker könnte in einem nächste Schritt elektrisch beheizt werden und die Nebenprodukte anderweitig verwendet werden (befindet sich im Entwicklungsstadium, größte Herausforderung ist die hohe Wärmemenge auf kleinem Raum).
- Methanol-to-Olefin/Aromatics:** Alternativ können die gewünschten Produkte über emissionsarmes Methanol als Einsatzstoff im Methanol-to-Olefins bzw. -Aromatics Prozess gewonnen werden. Hier wird Methanol in einer katalytischen Reaktion zu dem gewünschten Produkt umgewandelt. Im Gegensatz zur Referenzroute kann aus dem Prozess nur ein einzelnes Produkt gleichzeitig gewonnen werden, da unterschiedliche Katalysatoren für die gewünschten Produkte benötigt werden. Der MTA-Prozess ist bereits großtechnisch einsetzbar und der MTO-Prozess befindet sich im Endstadium der Entwicklung (TRL 7).

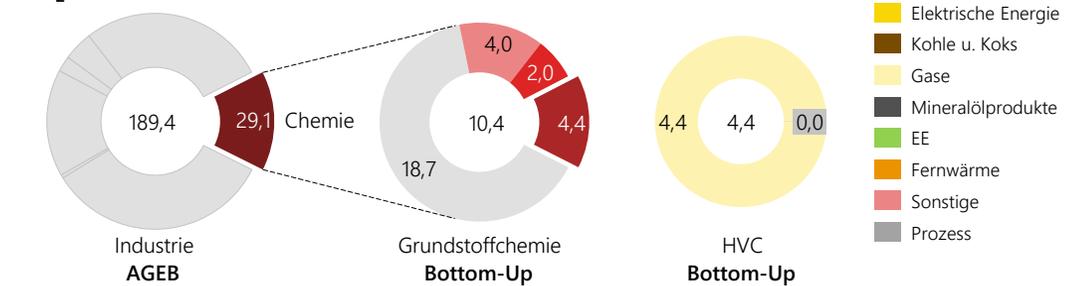
Produktionsstandorte



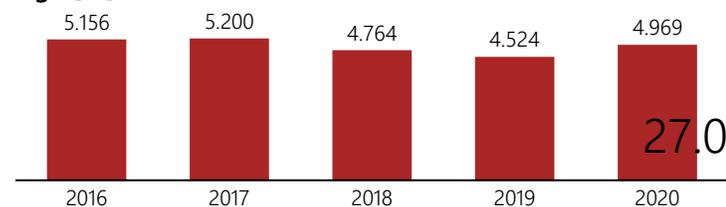
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

* Die Differenz enthält neben dem Delta zwischen AGEb und Bottom-Up-Berechnung auch die sonstigen WZ der Chemie, welche aufgrund ihrer hohen Elektrifizierung eine untergeordnete Rolle spielen

Prozessbeschreibung der Status-quo-Technologien

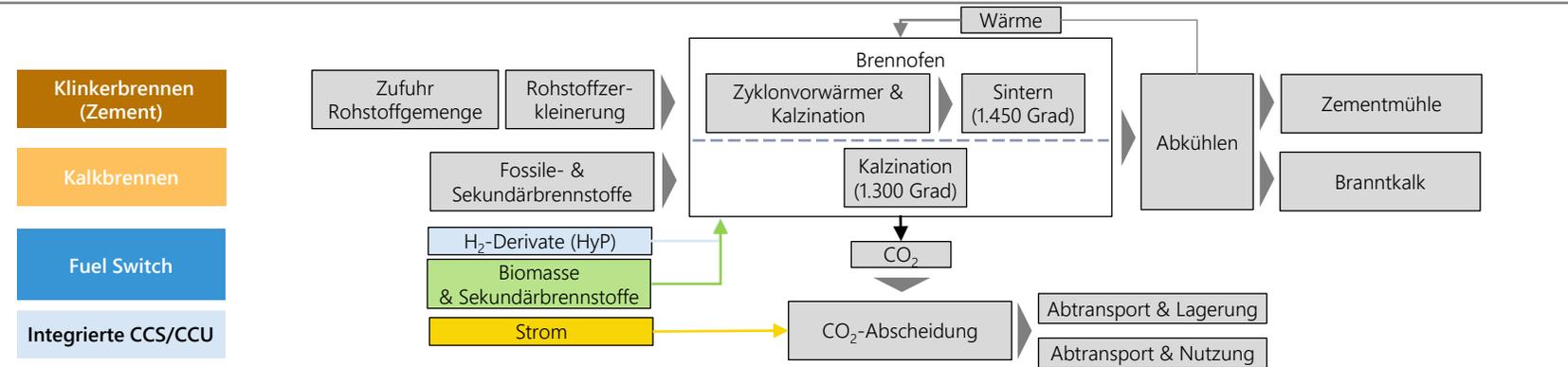
- Zement:** Zement besteht zu ca. 75% aus Calciumoxid, das auch Branntkalk genannt wird. Als Ausgangsrohstoff für die Herstellung von Zement wird ein Gemenge aus Kalkstein und Ton gemahlen und homogenisiert. Das Gemenge wird in einem Zyklonvorwärmer entsäuert (Kalzination). Dabei spaltet sich das Kohlendioxid vom Kalk (CaCO_3) ab und es entsteht Branntkalk. Bei diesem Prozess werden bereits 60% des Wärmebedarfs verbraucht und es entstehen ca. 80% der CO_2 -Emissionen. In einem weiteren Schritt wird das Gemenge aus Branntkalk in einem Drehrohrföfen bei bis zu 1450 °C zu Zementklinker gesintert. Nach der Abkühlung des Klinkers wird durch Zugabe weiterer Zusatzstoffe und das Zerkleinern in der Zementmühle der fertige Portlandzement hergestellt. Insgesamt werden ca. 66% der Emissionen durch den Prozess und ca. 34% durch den Einsatz von Brennstoffen erzeugt.
- Kalk:** Bei der Kalkherstellung wird reiner aufbereiteter Kalk bei ca. 1.300 °C in einem Schacht- oder Drehrohrföfen zu reinem Branntkalk umgesetzt. Dabei werden feste Brennstoffe (Steinkohle, Koks und Braunkohle) und Erdgas zur Befuerung des Prozesses eingesetzt. Auch hier machen die Emissionen aus dem Prozess die größeren Anteile aus. Der Branntkalk wird im Anschluss abgekühlt und kann zu verschiedenen Produkten (z.B. Löschkalk) weiterverarbeitet werden.

Prozessbeschreibung der Transformationspfade

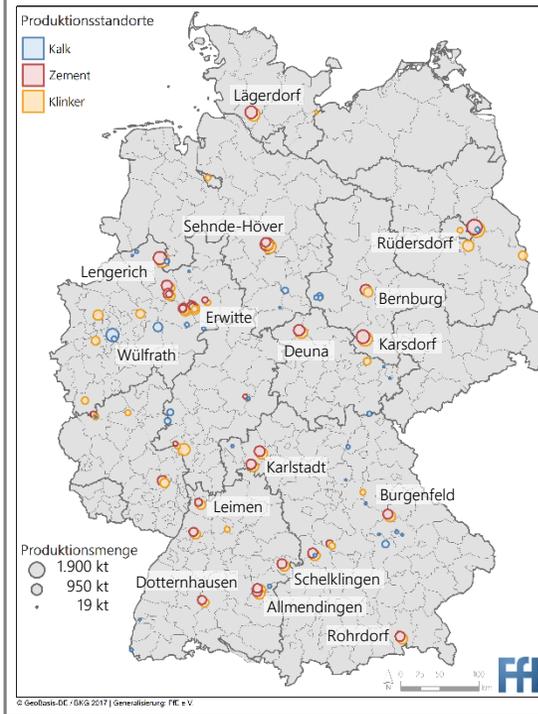
- Fuel Switch:** ca. 30 % der Brennstoffbedarfe des Klinkerbrennens werden über fossile Energieträger (v.a. Kohle) gedeckt, während alternative Brennstoffe (z.B. Altreifen, Altöl, Tiermehl, Klärschlamm) 70 % decken. Beim Kalkbrennen kommen bis zu 90 % Kohle und Erdgas zum Einsatz. Mit geeigneten Brennertechnologien können Wasserstoffderivate (HyP) oder Biomasse die fossilen Brennstoffe im Prozess ersetzen. Wasserstoff ist durch seine geringe Strahlungswärme ungeeignet für die Verwendung im Drehrohrföfen.
- CCS/CCU:** Unabhängig vom eingesetzten Brennstoff wird ohne eine sprunghafte Entwicklung der alternativen Bindemittel CCS/CCU aufgrund der Prozessemissionen für eine tiefe Dekarbonisierung benötigt.
- Alternative Bindemittel:** Als Alternativen zum Portlandzement werden andere Bindemittel wie z.B. magnesiumbasierte Zemente (Navocem, untersucht. Außerdem wird durch andere Produktionsprozesse (Celitement) versucht, die Prozessemissionen zu reduzieren. Die meisten Technologien befinden sich noch im Entwicklungsstadium und werden in Pilotanlagen getestet.

Abschlussbericht

Quellen: /VDZ-01 20/, /FFE-123 19/



Produktionsstandorte

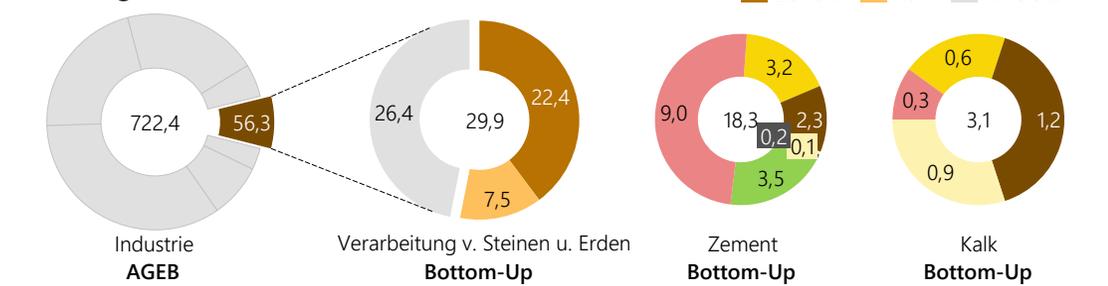


Zement: **34 Standorte** | Klinker: **48 Standorte**

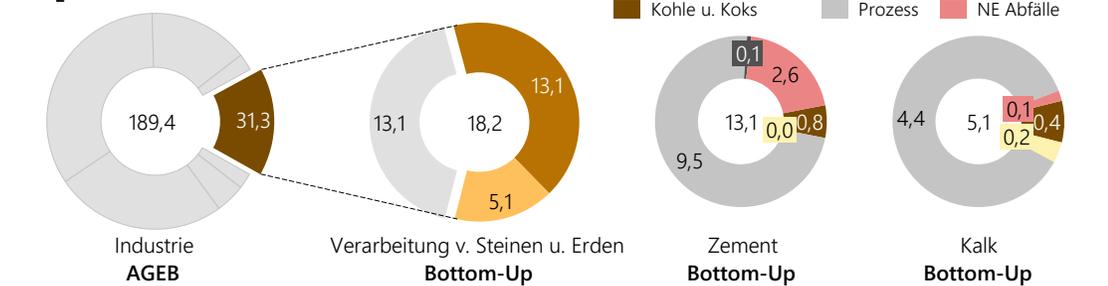
Kalk: **35 Standorte**

WZ-Klassifikation: **23.5, 23.6**

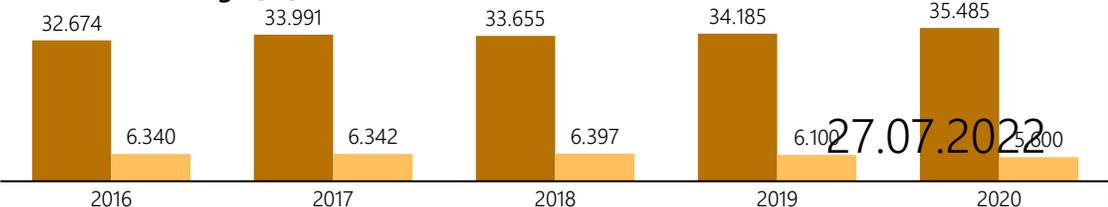
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

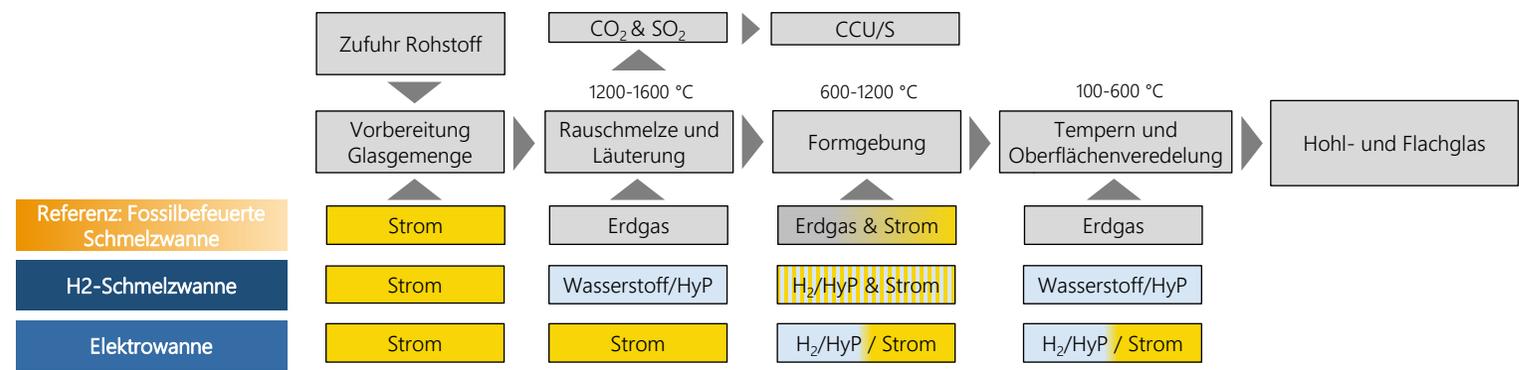
Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

- Schmelzprozess:** Zur Vorbereitung der Glasschmelze müssen die Ausgangsrohstoffe (z.B. Quarzsand, Soda, Pottasche, Feldspat, Kalk, Dolomit und Altglas) in einer je nach Glasprodukt bestimmten Zusammensetzung gemischt und auf eine Korngröße von unter 0,5 mm gebrochen werden. Dabei gilt: je besser die Durchmischung des Gemenges und je höher der Anteil an recyceltem Altglas, desto geringer ist der Energiebedarf für die Schmelze. Das Gemenge wird kontinuierlich an der Kopfseite des Ofens zugeführt und durch die Hitze der Brennerflammen, die über die Oberfläche des festen und schmelzenden Rohmaterials gerichtet sind, eingeschmolzen (Rauschmelze). Durch den Temperaturunterschied können feste Bestandteile durch die Schwerkraft auf den Boden sinken. Um dies zu verhindern, wird durch Elektroden oder durch den Eintrag von Gas eine Kreislaufströmung erzeugt, welche die festen Bestandteile wieder in den Schmelzbereich fördert. Verunreinigungen wie CO₂ und SO₂, die beim Einschmelzen entstehen, werden durch die kontinuierliche Befuerung aus der Schmelze herausgetrieben (Feinschmelze), wodurch das Gemisch weiter homogenisiert wird. Der durch die Abgase entstehende Wärmeaustag kann durch eine Wärmerückgewinnung der Verbrennerluft zugeführt werden. Nach bis zu 24 Stunden und der Abkühlung auf die optimale Temperatur wird die homogene Schmelze aus der Schmelzwanne abgeleitet und in der Formgebung weiterverarbeitet. Durch die Formgebung entstehen im Glaskörper Spannungen, welche die Qualität deutlich beeinflussen. Daher muss das Glas im Anschluss in einem Temperprozess definiert abgekühlt werden (zusätzlicher Wärmeeintrag), um so das Glas zu entspannen (Ausnahme sind bewusst erzeugte Spannungen für besonders harte Glassorten). Zusätzlich können die Oberflächen durch mechanische oder chemische Bearbeitung veredelt werden.

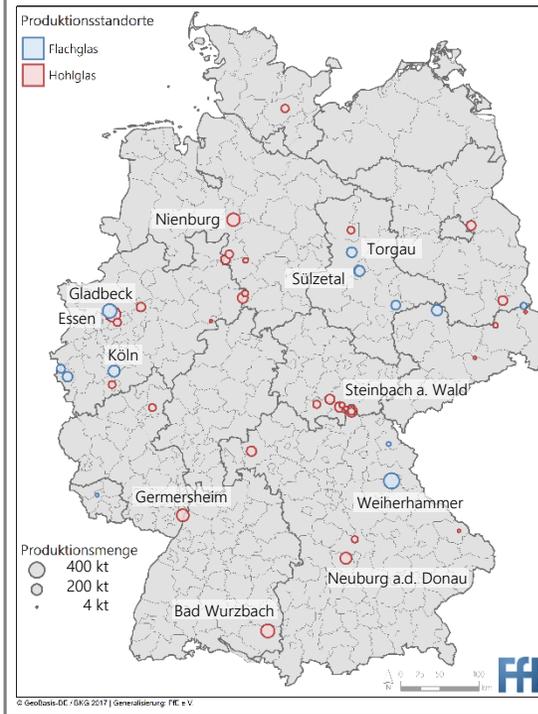
Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- H₂-Wanne:** Der Schmelzprozess in einer H₂-befeuerten Schmelzwanne folgt den gleichen Schritten wie in der Referenzroute. Wegen der unterschiedlichen Flammenbildung und Wärmeübertragung von H₂ im Vergleich zu Erdgas müssen zur Qualitätssicherung und Prozessoptimierung weitere Forschung und Pilotversuche durchgeführt werden. Für die weiteren Prozesse kann ebenfalls das Erdgas durch Wasserstoff ersetzt werden. Das in der Schmelze entstehende Prozess-CO₂ könnte durch geeignete CCU/CCS-Maßnahmen verarbeitet werden.
- Elektrowanne:** Der Schmelzprozess bleibt gleich, wird aber ausschließlich durch Elektroden am Ofenboden beheizt. Heutige Elektrowannen in Deutschland sind vergleichsweise klein. Für die Beheizung der weiteren Prozessschritte können entweder Elektrostrahler oder Wasserstoffbrenner eingesetzt werden.

Quellen: /DFBE-10 19/, /AGORA-07 19/



Produktionsstandorte

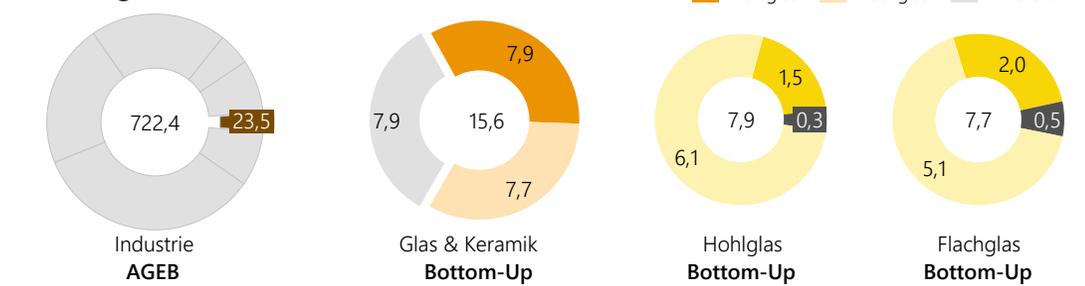


Flachglas: 13 Standorte

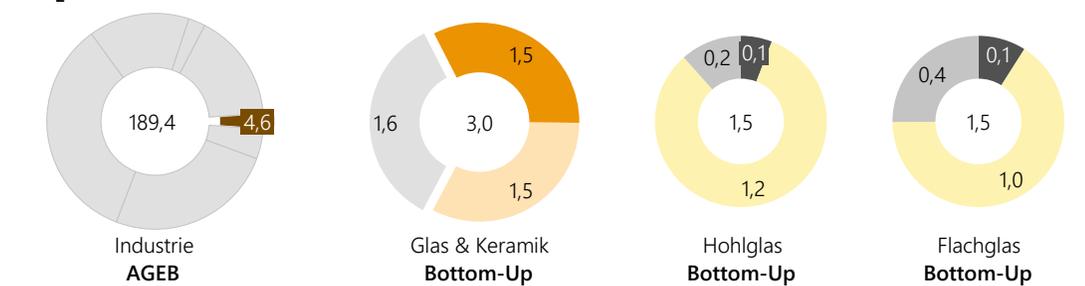
Hohlglas: 33 Standorte

WZ-Klassifikation: 23.1, 23.2, 23.3

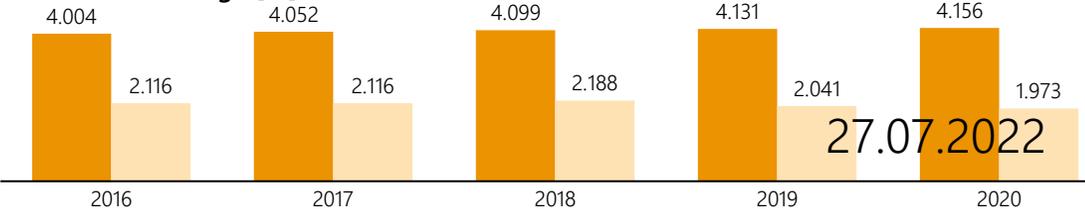
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

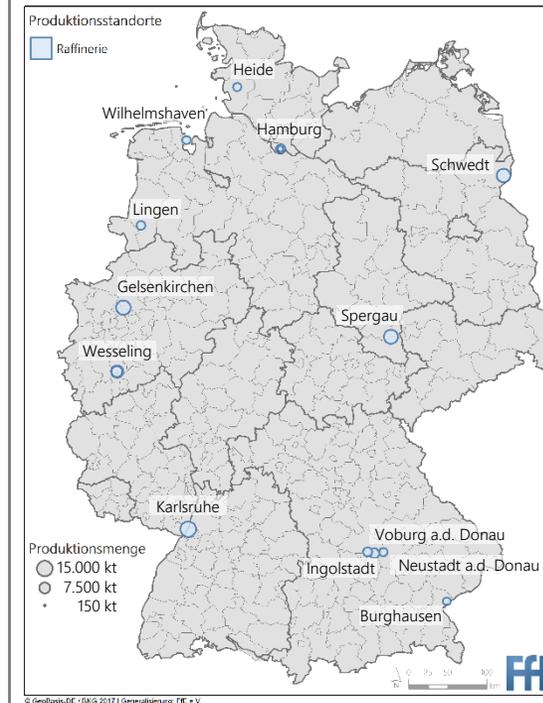
Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

- Raffinerieprozesse:** Heutige Raffinerieprozesse lassen sich in drei Hauptbereiche unterteilen: Trennung, Umwandlung (Konversion) und Nachbehandlung (Veredelung). Jenseits dieser übergeordneten Kategorisierung ist jedoch jede Raffinerie ein einzigartiger Industriepark, der für einen optimalen Betrieb im Hinblick auf die Eigenschaften der verfügbaren Rohstoffe und die Palette der gewünschten Endprodukte spezialisiert ist. Jede Raffinerie zeichnet sich wiederum durch unterschiedliche Prozesse innerhalb der drei übergreifenden Kategorien aus. Neben diesen gemeinsamen Hauptprozessen ist ein weiteres gemeinsames Merkmal aller Raffinerien der hohe Grad der Prozessintegration. Ausgehend vom Rohöl als Inputstoff wird eine breite Palette von Endprodukten hergestellt, wobei (zum Beispiel) die Abfallprodukte eines Prozessschrittes zum Ausgangsmaterial eines gekoppelten Prozesses werden oder zur Bereitstellung von Prozesswärme für einen vorgelagerten Prozessschritt verbrannt werden.
- Trennung:** Der wichtigste Prozessschritt der Trennung ist die Destillation, die den Ausgangspunkt für die weitere Verarbeitung des Rohöls in der Raffinerie darstellt. Bei der atmosphärischen Destillation wird das Rohöl auf 300-400 °C erhitzt, bevor es in eine Destillationskolonne geleitet und verdampft wird. Während das Gemisch in der Kolonne aufsteigt, kondensieren schwerere Fraktionen (z. B. Heizöl) in den unteren Ebenen der Kolonne, während leichtere Fraktionen (z. B. Benzin) in den höheren Ebenen kondensieren. Jede gesammelte Fraktion kann dann in weiteren Schritten getrennt verarbeitet werden. Die schwersten Fraktionen des Rohöls, die bei dem in der atmosphärischen Destillation verwendeten Druck nicht verdampfen, werden als Rückstände vom Boden der Destillationskolonne in den Vakuumdestillationsprozess geleitet. Hier wird ein ähnlicher Prozess bei höherem Druck (40-100 mbar) durchgeführt.
- Umwandlung:** Die Anteile der Ausgangsprodukte aus der Destillation hängen von den Eigenschaften des verarbeiteten Rohöls ab, sind aber für eine bestimmte Art von Rohstoffen relativ fest – wesentliche Änderungen des Verhältnisses der Ausgangsprodukte lassen sich nicht allein durch verfahrenstechnische Anpassungen erreichen. Um ein Endproduktspektrum zu erreichen, das die Nachfrage des Markts besser widerspiegelt, sind nach der Trennungstufe zusätzliche Umwandlungsprozesse erforderlich. Ziel ist es in der Regel, den Anteil an Leichtprodukten (z.B. Benzin) aus dem Prozess zu erhöhen. Je nach Rohöl-Einsatzmaterial und gewünschten Endprodukten werden thermische Crackverfahren (ca. 500 °C), katalytische Crackverfahren (ca. 500 °C) oder Hydrocrackverfahren (100-150 bar und in Gegenwart von H₂) eingesetzt.
- Nachbehandlung:** Produkte aus den Umwandlungsprozessen müssen i.d.R. noch aufgewertet werden, bevor sie die Raffinerie verlassen. Für Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel ist die Entschwefelung einer der wichtigsten dieser Prozesse. In einer Entschwefelungsanlage wird das Produkt mit Wasserstoff vermischt und in Gegenwart von Katalysatoren auf 300-400 °C erhitzt, wobei sich der Schwefel im Produkt an die Wasserstoffmoleküle bindet und abgetrennt wird.
- Integrierte Petrochemie:** Neben den typischen Raffinerieprodukten wie Kraftstoffen oder Heizöl können auch wichtige chemische Produkte hergestellt werden. Das bei der Destillation aus dem Rohöl abgetrennte Naphtha kann in Steamcracker geleitet werden (siehe HVC). Methanol wird in Europa in der Regel aus Erdgas synthetisiert, aber ein Großteil seiner Produktion in Deutschland basiert auf der Vergasung schwerer Rückstände, die bei der Destillation übrig bleiben. Diese integrierten petrochemischen Prozesse könnten für Raffinerien an Bedeutung gewinnen, da die Elektromobilität die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen reduziert. Langfristig müssen die Raffinerien jedoch ihr auf Erdöl basierendes Kerngeschäftsmodell vollständig ändern, um klimaneutral zu werden.

Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- PtL:** „Syn crude“ aus Fischer-Tropsch-basierten PtL-Prozessen kann in Raffinerien zu synthetischen Kraftstoffen verarbeitet werden. Integrierte Produktion direkt an Raffineriestandorte wäre auch bei für die Elektrolyse ausreichendem grünem Strom möglich.
- Biofuels:** Prozesse zur Herstellung von Biokraftstoffen können mit einer Umwidmung bestehender Anlagen auch an Raffineriestandorten eingebunden werden. Zwar stellt dies ein neues Geschäftsmodell mit neuen Feedstocks dar, aber es kann von Erfahrungen mit ähnlichen Prozessen und bestehenden Infrastrukturen profitieren. Manche Produkte können direkt mit fossilen Produkten zusammenverarbeitet werden. Beide Transformationsprozesse erzeugen wiederum Naphtha als Nebenprodukt, welches für die Chemische Industrie essenziell ist.

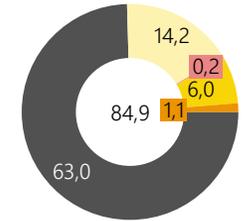
Produktionsstandorte



Raffinerie: **14 Standorte** + Wilhelmshaven (keine Produktion in 2018)

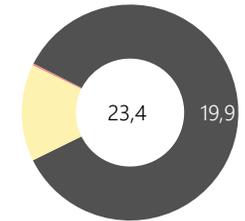
WZ-Klassifikation: **19.2**

Endenergieverbrauch [TWh]



Raffinerie
AGEB 2018

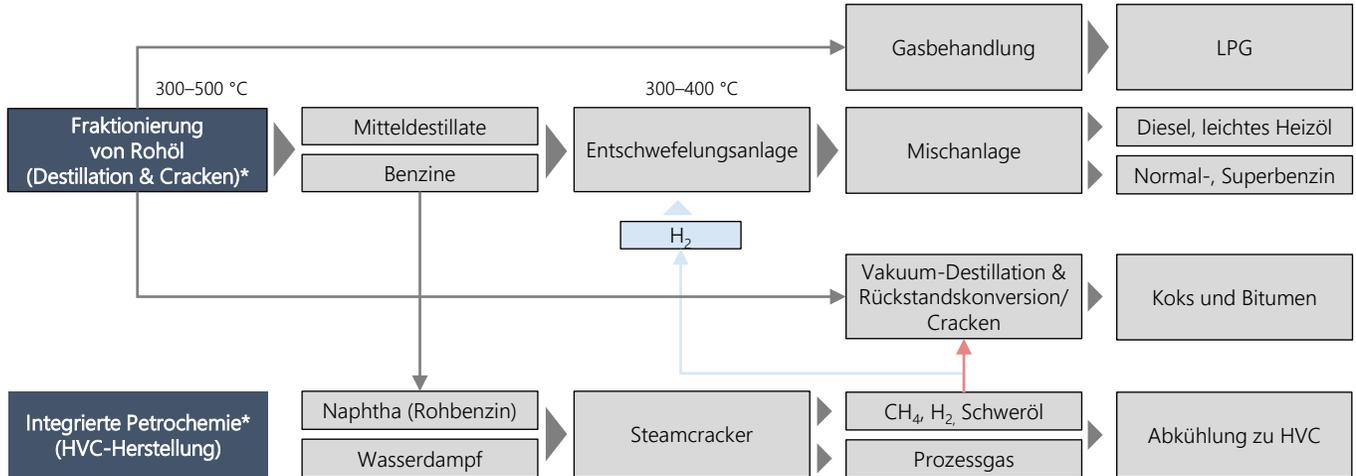
CO₂-Emissionen [Mt]



Raffinerie
AGEB 2018

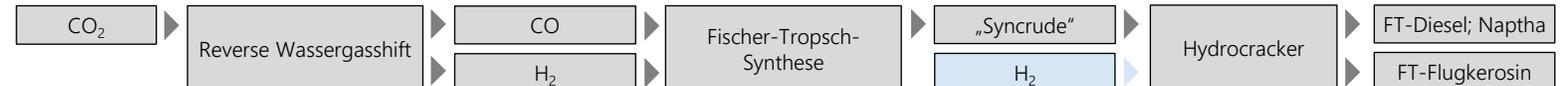


Bestehende Raffinerieanlagen

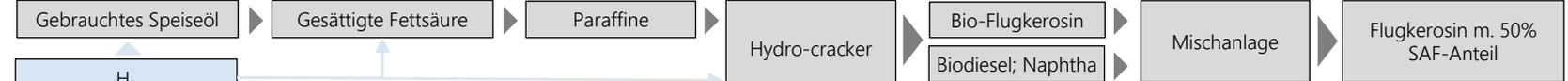


Integrierte Petrochemie* (HVC-Herstellung)

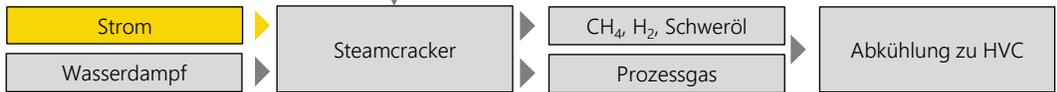
Power-to-Liquids (Fischer-Tropsch-Route)*



Biokraftstoffe (HEFA-Route)*



Integrierte Petrochemie (HVC-Herstellung)



Abschlussbericht

27.07.2022

*Stark vereinfachte Darstellung von einzelnen ausgewählten Prozessen und Integrationsmöglichkeiten – kein Anspruch auf Vollständigkeit

Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

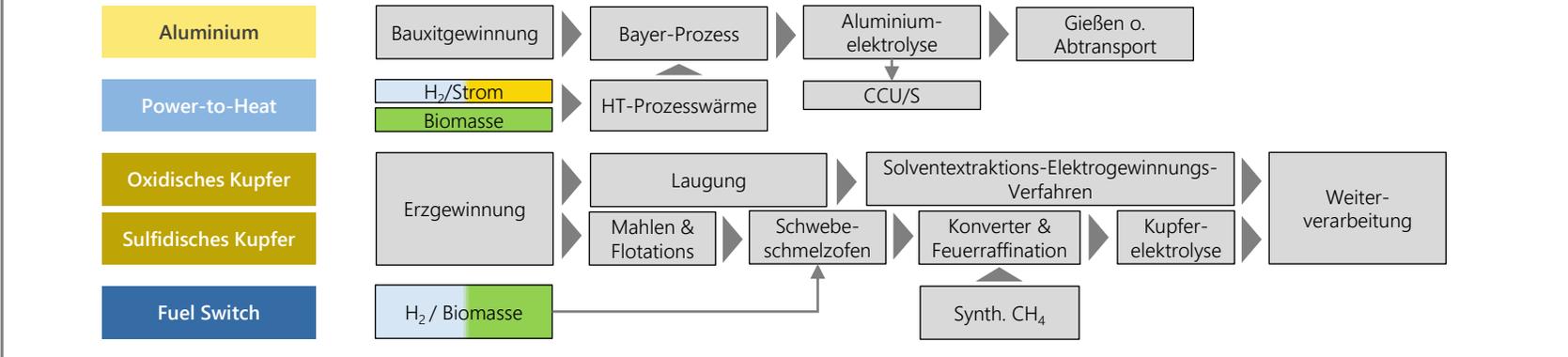
Aluminiumherstellung: Im ersten Schritt wird Bauxit im Tagebau abgebaut und nach Deutschland exportiert. Um das für die Weiterverarbeitung notwendige Aluminiumoxid zu gewinnen, wird das Bauxit im sogenannten Bayer-Prozess durch verschiedene Mahl-, Filter- und Brennprozesse aufbereitet. Anschließend kann das Aluminiumoxid in der Elektrolyse zu Aluminium verarbeitet werden. In Deutschland kommt hierfür ausschließlich die Schmelzflusselektrolyse nach dem Hall-Heroult-Verfahren zum Einsatz. Hierbei wird das Aluminiumoxid mit Hilfe von Grafit-Anoden durch Gleichstrom bei einer konstanten Temperatur von ca. 950 °C zu Aluminium reduziert. Die Einhaltung der Temperatur ist dabei stets zu gewährleisten. Während das Aluminium reduziert wird, reagiert der freigewordene Sauerstoff mit dem Kohlenstoff der Anode zu Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Der Hauptbrennstoffbedarf entsteht durch den Verschleiß der Elektroden und die Aufbereitung des Bauxits zu Aluminiumoxid.

Kupferherstellung: Die Kupferherstellung unterscheidet sich wegen der Zusammensetzung des Ausgangsrohstoffes in zwei Prozesse. Beim sulfidischen Kupfererz wird das Erz gemahlen und durch Flotation das hydrophobe Kupfererz angereichert. Dabei fallen etwa 70% des gesamten Energieverbrauchs an. Anschließend wird das Kupferkonzentrat in einem Schwebeschmelzofen durch Zugabe von Sauerstoff in einer exothermen Reaktion bei 1200 °C zu Kupferstein (Cu₂S, 65% Kupfer) geschmolzen. Zur Steigerung des Reinheitsgrads wird mit Hilfe eines Konverters Rohkupfer (98%) erzeugt und durch Feuerraffination mit Hilfe von Erdgas das restliche Eisen und Schwefel herausgetrieben (Anodenkupfer 99%). Abschließend werden in der Kupferelektrolyse die restlichen Nicht-Kupfer Metalle entfernt und hochreines Kathodenkupfer (99,95%) hergestellt. Da das oxidische Kupfer nicht hydrophob ist, muss es zunächst mit Schwefelsäure behandelt werden und kann anschließend durch das Solventextraktions-Elektrogewinnungs-Verfahren direkt zu Kathodenkupfer verarbeitet werden.

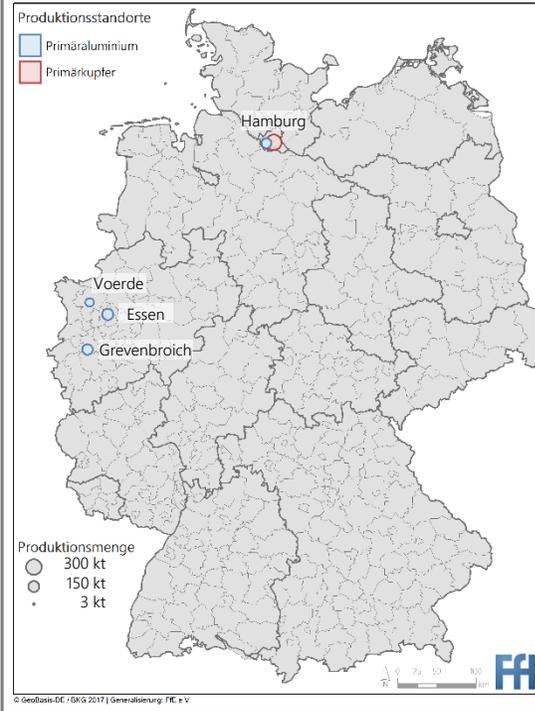
Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- Inerte Anode/benetzte Kathode:** Inertes Anoden-Material zur Reduktion der Emissionen durch den Anodenverbrauch oder benetzte Kathode zur Verringerung des Abstandes zwischen den Elektroden und Reduktion des Widerstandes (Stromverbrauch).
- Power-to-Heat & CCU/S:** Befuerung des Bayer-Prozesses mit Power-to-Heat und Abscheidung der Prozessemissionen durch CCU oder CCS.
- Fuel Switch:** Befuerung des Schwebeschmelzofens mit HyP oder Biomasse und Einsatz von synth. Methan zur Reduktion des Eisens und Schwefels.
- Sekundärroute:** energiearme Lösung -> Recycling

Quellen: /FFE-59 18/



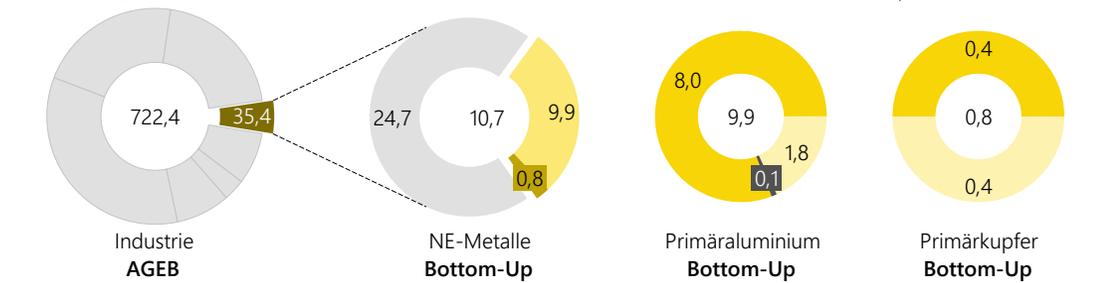
Produktionsstandorte



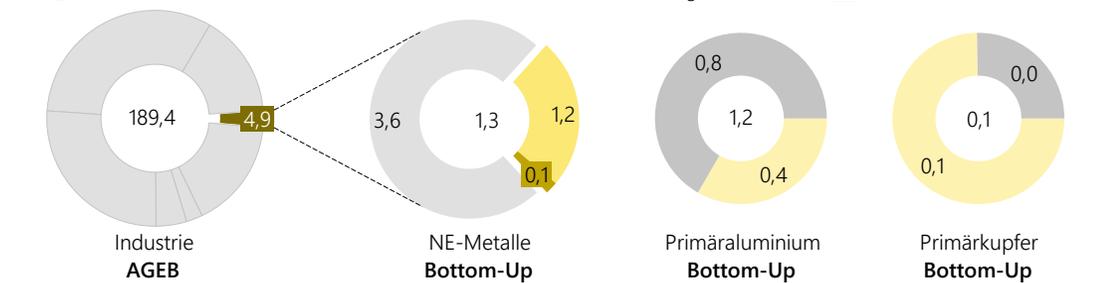
Primäraluminium: **4 Standorte**

WZ-Klassifikation: **24.42**

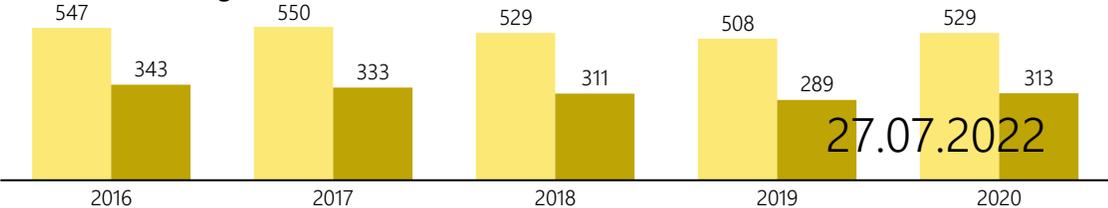
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



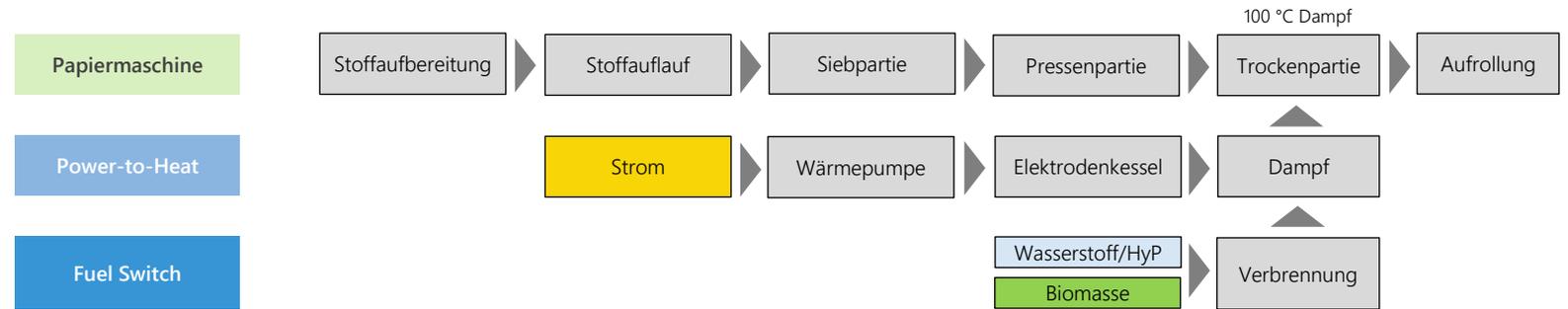
Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

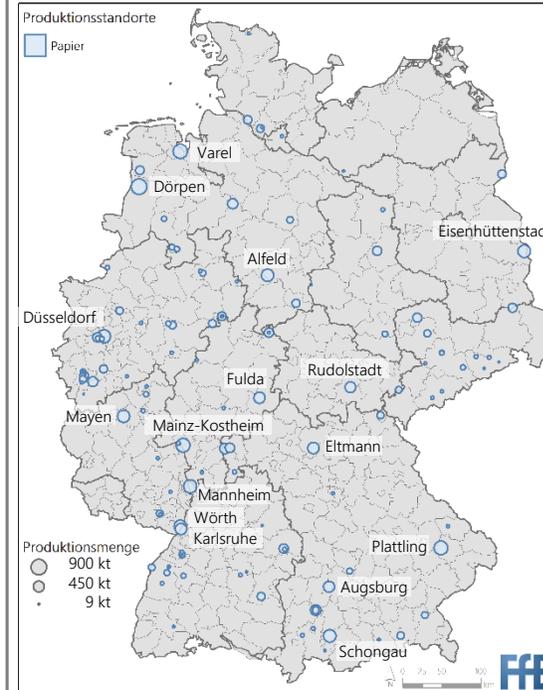
- Papiermaschine:** Zunächst wird ein konstanter Stoffstrom aus Fasern, Füllstoffen und Wasser erzeugt. Dieser wird anschließend mittels Prozesswasser verdünnt, um den gewünschten Faserstoffgehalt (0,1-1,4 Prozent) zu erreichen. Außerdem wird er gereinigt, entlüftet und mit einer geregelten Geschwindigkeit in den Stoffauflauf der Papiermaschine gebracht. In der bis zu 250 Meter langen Papiermaschine wird aus der verdünnten Faserstoffsuspension ein Blatt erzeugt, welches durch Filtration, Pressen und thermische Trocknung entwässert und schließlich auf den Tambour aufgewickelt wird. Zusätzliche Prozesseinheiten zur Oberflächenbehandlung und Veredelung wie Leimpresen, Streichanlagen und Kalande werden je nach Papier- und Kartonqualität entweder vor oder zwischen der Trocknungspartie und der Aufrollung (online) oder außerhalb der Papiermaschine (offline) eingesetzt.



Prozessbeschreibung der Transformationspfade

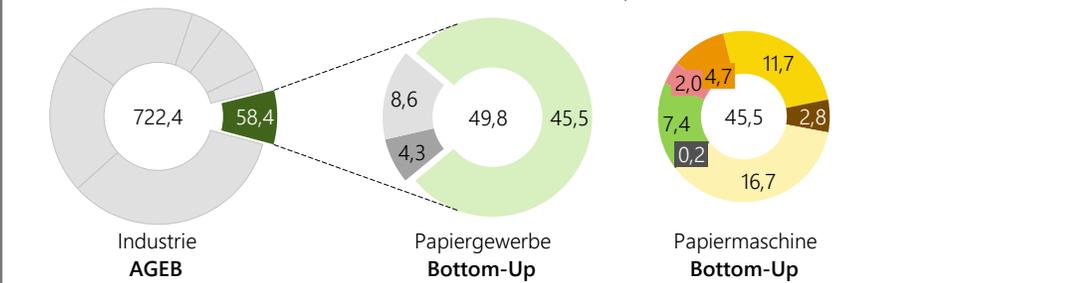
- Power-to-Heat/Fuel Switch:** Der Hauptanteil der fossilen Energie bei der Papierproduktion wird für die Bereitstellung des Dampfes in der Trockenpartie benötigt. Dabei werden die feuchten Papierbahnen durch mehrere dampfbeheizte Trockenzylinder geführt. Als Transformationstechnologie bietet sich hier der Elektrodenkessel (PtH) mit seiner relativ hohen Effizienz und der flexiblen Dampfproduktion an. Diese Technologie wird bereits in einigen Papierfabriken erfolgreich angewandt. Zur weiteren Effizienzsteigerung können in der Zukunft Wärmepumpen zur Voranhebung des Temperaturniveaus eingesetzt werden. Der Einsatz von Wasserstoff, Derivaten (HyP) oder Biomasse wäre hier als Ersatz für das heute eingesetzte Erdgas ebenso denkbar.

Produktionsstandorte

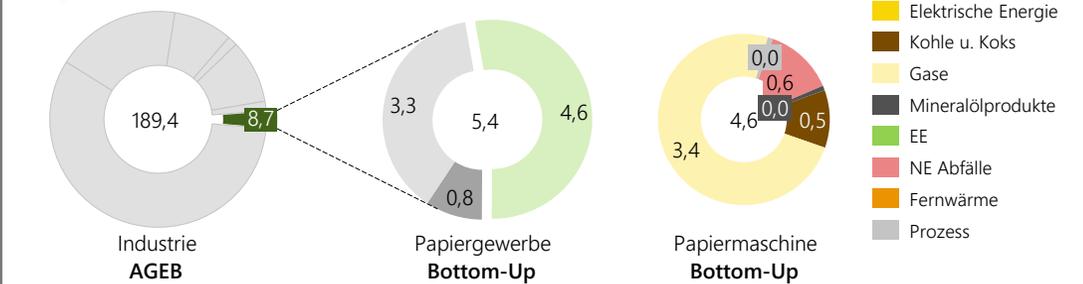


Papier: **121 Standorte**
 Davon mit Altpapierverwertung: **62 Standorte**
 WZ-Klassifikation: **17.2**

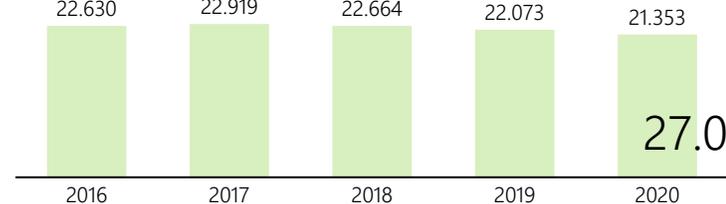
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

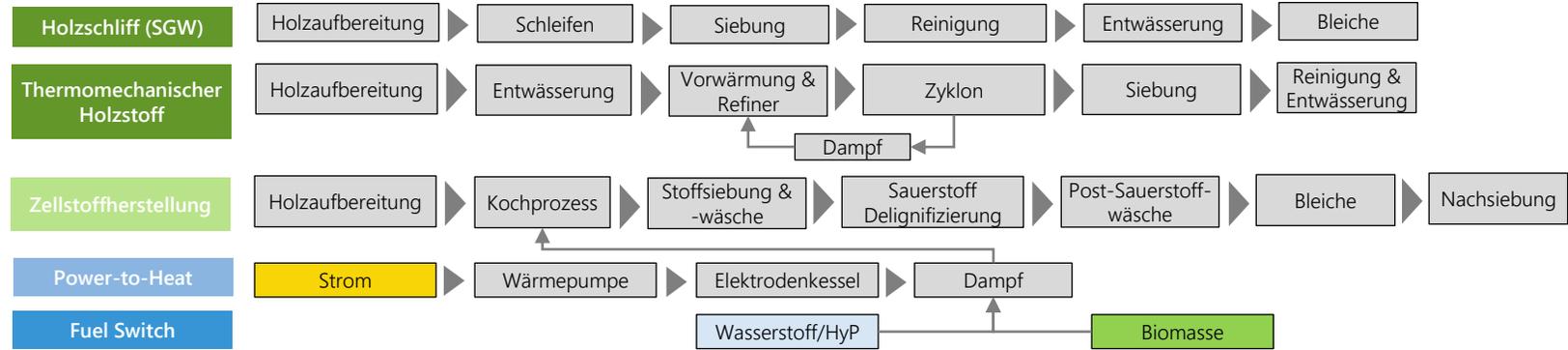
- Holzschliff (SGW) & Thermomechanischer Holzstoff (TMP):** Beim SGW-Aufschluss werden Stämme unter Zugabe von Wasser gegen einen rotierenden Mahlstein gepresst und der Holzstoff durch Siebung, Reinigung, Entwässerung und Bleichung hergestellt. Der TMP-Holzstoff wird nach der Behandlung mit Dampf (um die Fasern durch Quellung leichter zu verarbeiten) durch die Defibrierung (Zerfaserung) von Hackschnitzeln zwischen Metallscheiben hergestellt. Im Refiner des TMP-Verfahrens werden Temperaturen zwischen 120 °C und 135 °C benötigt, um den größten Teil der Fasern aufzuweichen und leichter abzutrennen. Ein Großteil der im Refiner eingesetzten elektrischen Energie wird in Wärme umgewandelt und setzt den Prozess durch Dampf, der aus der Holzfeuchtigkeit und dem Verdünnungswasser in den Refinern erzeugt wird, unter Druck. Aufgrund der Druckbedingungen (Druck von bis zu 6 bar) kann eine signifikant hohe Energiemenge für andere Prozessschritte wie die Papier- oder Zellstofftrocknung zurückgewonnen werden.

- Zellstoffherstellung:** Die Holz hackschnitzel werden zunächst bei hohen Temperaturen zusammen mit Chemikalien gekocht, um die Fasern aus der Holzmatrix freizusetzen und um das Lignin weitgehend in der Kochlauge zu lösen und aus dem Prozess auszuschleusen. Erst im Anschluss daran erfolgt der Bleichvorgang, um das Restlignin zu entfernen. Dabei unterscheidet man zwei verschiedene Prozessvarianten, welche sich wiederum in der Chemie des Kochprozesses, dem chemischen Rückgewinnungssystem, der Anzahl an nötigen Bleichschritten und den eingesetzten Mengen an Bleichchemikalien unterscheiden. Die Herstellung von Zellstoff kann in vier Hauptprozessschritten unterteilt werden: die Rohstoffhandhabung, der chemische Aufschluss (Delignifizierung) mit einem fast vollständig geschlossenen Chemikalien- und Energierückgewinnungssystem, das Bleichen mit einem offenen Wassersystem und das prozesseexterne Abwasserbehandlungssystem. Durch die Verbrennung des heizwertreichen Lignins in der Ablaage lässt sich der Energieeinsatz für fast den gesamten Zellstoffherstellungsprozess abdecken. Die Chemikalien werden dabei nahezu vollständig recycelt. Zur Herstellung von Marktzellstoff wird der Zellstoff anschließend getrocknet.

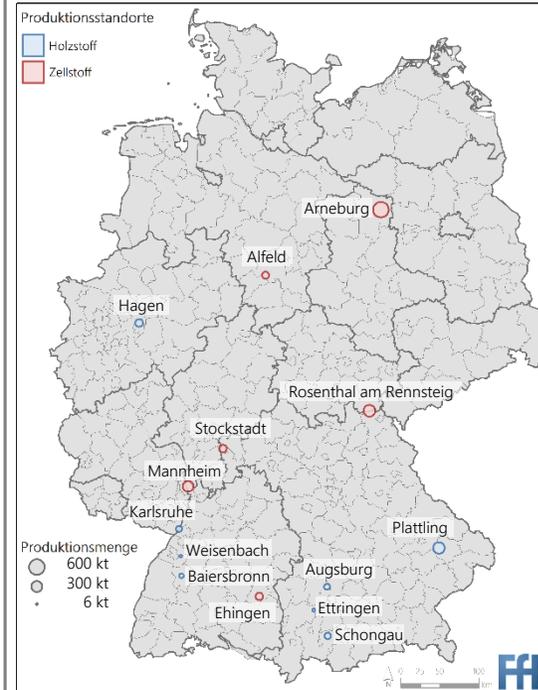
Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- Power-to-Heat:** Bei der Zellstoffherstellung können die fossilen Energieträger für die Bereitstellung der Dampferzeugung durch elektrische Energie in Wärmepumpen und Elektrodenkesseln ersetzt werden. Wie bei der Papierherstellung können auch hier Wasserstoff, seine Derivate (H₂) und Biomasse eingesetzt werden. In der Holzstoffproduktion wird durch die Zerfaserung so viel Wärmeenergie erzeugt, dass durch Wärmerückgewinnung die Prozesse mit genügend Energie versorgt werden können.

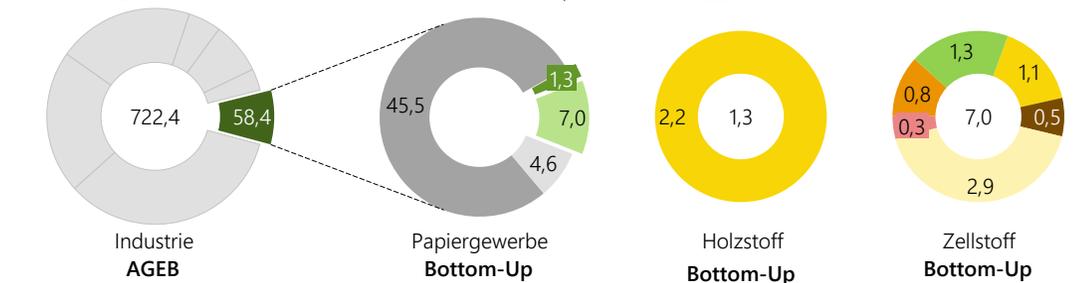
Quellen: /NAV-02 19/, /SAUIG-02 21/



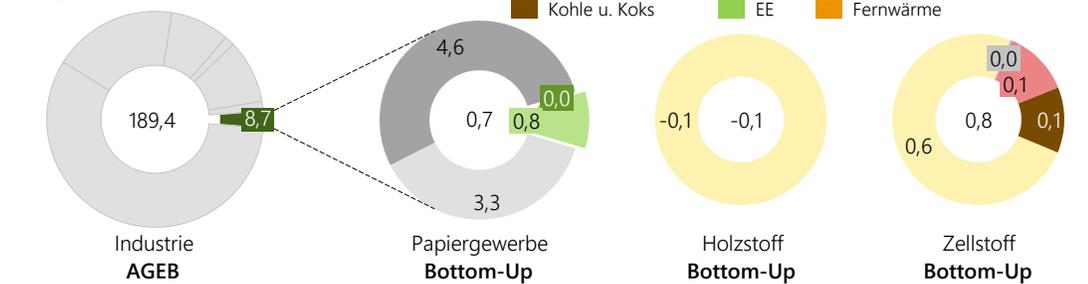
Produktionsstandorte



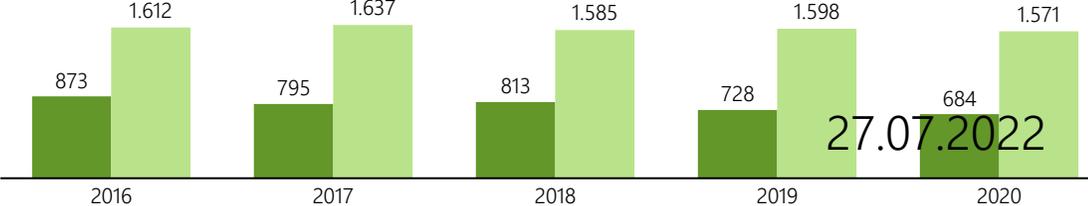
Endenergieverbrauch [TWh]



CO₂-Emissionen [Mt]



Produktionsmenge [kt]



27.07.2022

Holzstoff: 8 Standorte

Zellstoff: 6 Standorte

WZ-Klassifikation: 17.1

Sonstige | Niedertemperatur-Prozesswärme (NT-Prozesswärme)

Prozessbeschreibung der Status quo-Technologien

• **NT-Prozesswärme:** Heutzutage wird die Prozesswärme hauptsächlich durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen hergestellt. Dabei spielt Erdgas eine große Rolle. Allgemein lässt sich die Prozesswärme in folgende drei Temperaturbereiche einteilen:

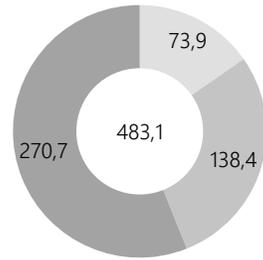
- Niedertemperatur (NT) <100 °C
- Mitteltemperatur (MT) 100-500 °C
- Hochtemperatur (HT) >500 °C

Prozessbeschreibung der Transformationspfade

- **Power-to-Heat:** Die Transformation der NT-Prozesswärme kann je nach Temperaturniveau durch verschiedene Technologien erfolgen. Die Wärmepumpe (WP) eignet sich für niedrige Temperaturniveaus <100 °C. Für die MT-Prozesswärme zwischen 100 und 200 °C eignet sich ein Kaskadensystem in Kombination mit einem Elektrodenkessel. Dabei wird der Vorteil der höheren Effizienz der WP im unteren Temperaturbereich ausgenutzt und mit dem Elektrodenkessel das vorgeheizte Wasser auf die gewünschte Dampftemperatur gebracht. Ab 200 °C kommt der Elektrodenkessel bis zu einer Temperatur von 500 °C zum Einsatz. Hierbei wird durch elektrischen Strom über zwei Elektroden das Wasser in einem Dampfkessel erhitzt. Oberhalb 500 °C lässt sich die Hochtemperatur-Prozesswärme nicht mehr auf einfache Weise elektrifizieren und muss durch Wasserstoff, seine Derivate (HyP) oder Biomasse ersetzt werden.
- **Wasserstoff/Derivate:** Da heute ein großer Teil der Prozesswärme durch Erdgasbrenner erzeugt wird, würde eine Umstellung auf Wasserstoff oder dessen Derivate einen technisch geringen Mehraufwand bedeuten. Allerdings ergibt sich durch die Umwandlungsverluste eine schlechtere Effizienz im Gesamtprozess. Eine weitere Möglichkeit stellt die KWK-Technik dar. Sie wird vor allem in der Grundstoffchemie als potenzielle Transformationstechnologie gesehen.

* Für die Elektrifizierung wird angenommen, dass der fossile Brennstoff durch die oben beschriebenen Power-to-Heat Technologien ersetzt wird. Als Wirkungsgrad werden folgende Werte angenommen: Boiler 90%, WP 350%, Elektrodenkessel 99%.

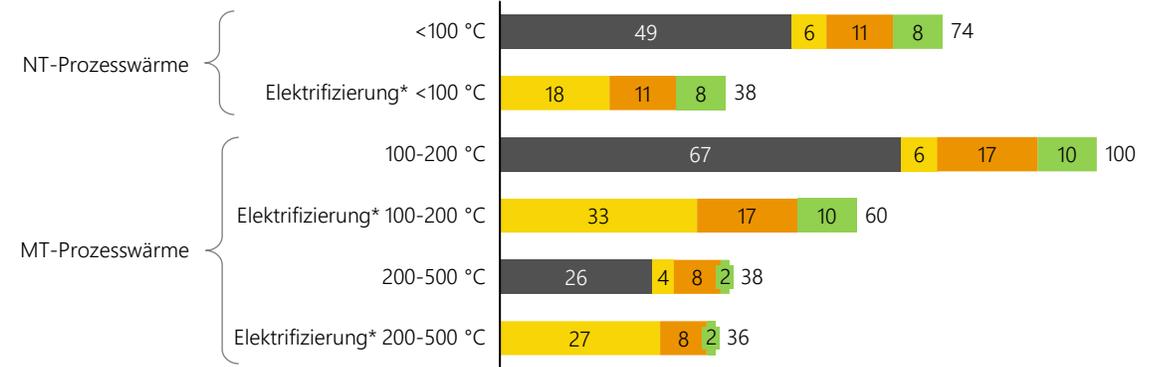
Endenergieverbrauch Prozesswärme [TWh]



Prozesswärme Gesamt
ISI Anwendungsbilanz

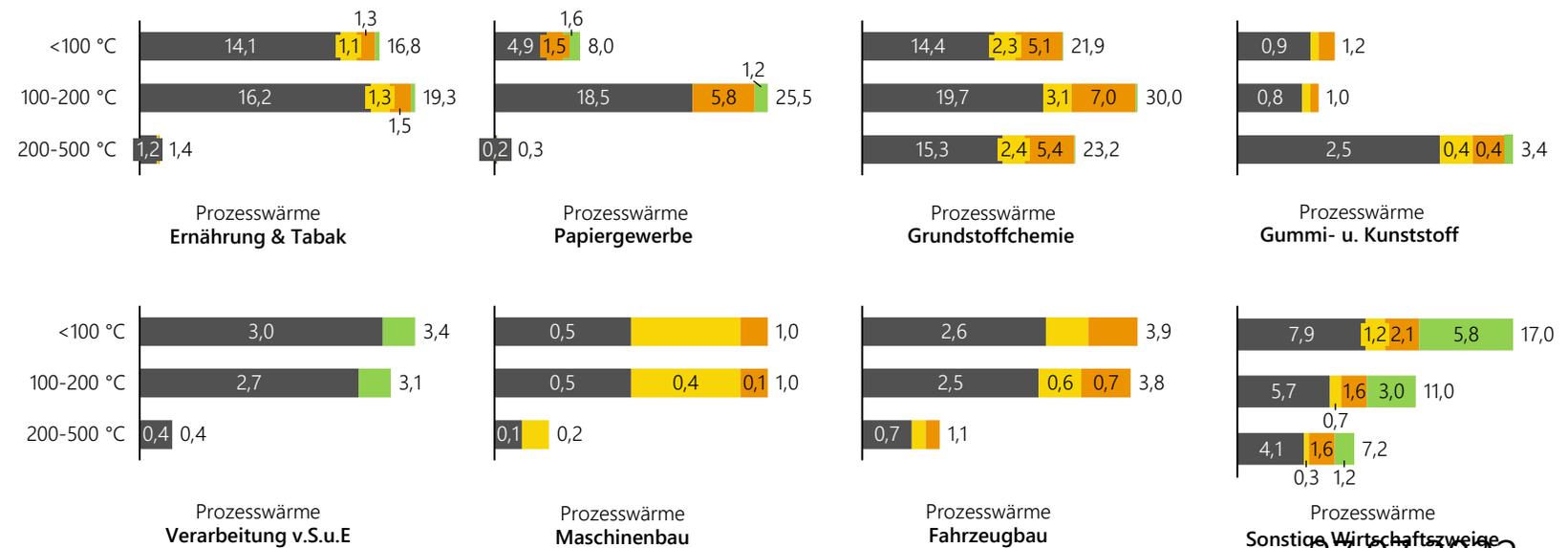
- NT-Prozesswärme
- MT-Prozesswärme
- HT-Prozesswärme

■ Fossile Brennstoffe ■ Strom ■ Fernwärme ■ Erneuerbare Energien



Aufteilung der Prozesswärmebereitstellung nach Energieträger

ISI Anwendungsbilanz



Die Wirtschaftszweige Glas & Keramik, Metallerzeugung und NE-Metalle werden aufgrund des geringen NT- & MT-Prozesswärmebedarfs nicht explizit aufgeführt.

Einschätzung zum Einsatz von Carbon Capture and Storage/Usage aus Sicht der Industrieprozesse

Prozesse	Einschätzung zum Einsatz von Carbon Capture (CC) in den ausgewählten Prozessen
Primär- & Sekundärstahl	Der Einsatz von CC an integrierten Hüttenwerken oder in Kombination mit dem Hisarna-Verfahren ist grundsätzlich denkbar und hat als Technologieoption in der Diskussion zur Treibhausgasverminderung in der Stahlindustrie nach wie vor seinen Platz. Allerdings existiert mit der Direktreduktionsroute eine Alternative zum Einsatz von CC, die noch dazu eine tiefere spezifische Treibhausgasverminderung verspricht. Aufgrund der vergleichsweise geringen erzielbaren Abscheiderate, die am Reaktor (Hisarna) und am Hochofen erzielt werden, können mittels CC in den beiden Prozessen die spezifischen Emissionen der Stahlerzeugung nur um 86% bzw. 76% reduziert werden.
Steamcracking & Dampfreformierung	Bei den Prozessen zur Herstellung von High-Value-Chemicals (im Steamcracker), Ammoniak und Methanol (via Dampfreformierung) stellt CC grundsätzlich eine Technologieoption dar (v.a., da es sich hier um große Punktquellen handelt). Auch hier gilt jedoch, dass die Abscheideraten aufgrund der verhältnismäßig geringen CO ₂ -Konzentration im Abgas relativ gering sind und andere strom- und H ₂ -basierte Verfahrensrouten existieren, mittels derer eine weitreichende Treibhausgasverminderung erzielt werden kann.
Aluminium & Kupfer	Im Bereich der Alu- und Kupferherstellung stellt CC bis dato keine realistische Technologieoption dar. Im Bereich der Aluminiumherstellung wird hieran aktuell allerdings geforscht. Die dortige Entwicklung sollte aufmerksam verfolgt werden, da hohe Unsicherheiten mit Bezug zur voraussichtlichen Marktreife der alternativen Technologie zur tiefen Treibhausgasverminderung (innovative Elektroden) existieren.
Zement & Kalk	Obwohl die CO ₂ -Abscheidung an Drehrohr- und Schachtöfen bis dato technisch noch nicht im großindustriellen Maßstab zur Verfügung steht, gilt der Einsatz in diesen beiden Prozessen als wahrscheinlich bzw. unausweichlich. Noch existieren keine weiteren Technologieoptionen, mit denen die dort auftretenden Prozessemissionen vollständig reduziert werden können. Dies ist insofern problematisch, als dass insbesondere die Zementindustrie geographisch flächendeckend über das Land verteilt ist und z.T. auch relativ kleine Punktquellen für CO ₂ vorliegen. Es existieren zahlreiche offene Fragen, was Infrastruktur für Transport und Speicherung von CO ₂ in diesen Prozessen angeht. Nichtsdestotrotz könnten durch den Einsatz von CC in Kombination mit biogenen Energieträgern die Prozesse Kalk und Zement perspektivisch zu einer CO ₂ -Senke werden.
Hohlglas & Flachglas	Die Problematik bei der Glasherstellung ist vergleichbar mit der bei Zement & Kalk. Auch wenn die Energieversorgung dieser Prozesse treibhausgasneutral gestellt wird, verbleiben Prozessemissionen, für deren Verminderung bis dato nur die CO ₂ -Abscheidung in Frage kommt. Darüber hinaus stellen Glasschmelzen ebenfalls relativ kleine und verteilte Punktquellen dar. Aufgrund dieser Faktoren ist mit hohen Treibhausgasverminderungskosten zu rechnen.
KWK-Anlagen	Grundsätzlich ist CC auch an KWK-Anlagen möglich. Wird die KWK mit Biomasse betrieben, kann sogar eine Emissionssenke erzeugt werden. Allerdings gilt sowohl für die KWK-Anlagen in der Papier- als auch der Chemieindustrie, dass keine 100%-ige Abscheidung möglich ist (bzw. extrem aufwändig wäre) und technisch weniger aufwändige direktelektrische Anwendungen zur Verfügung stehen.

3. Transformationspfade der deutschen Industrie

Methodik und Ergebnisse
der Szenarien max. Strom
und max. H₂



Transformationspfade der deutschen Industrie

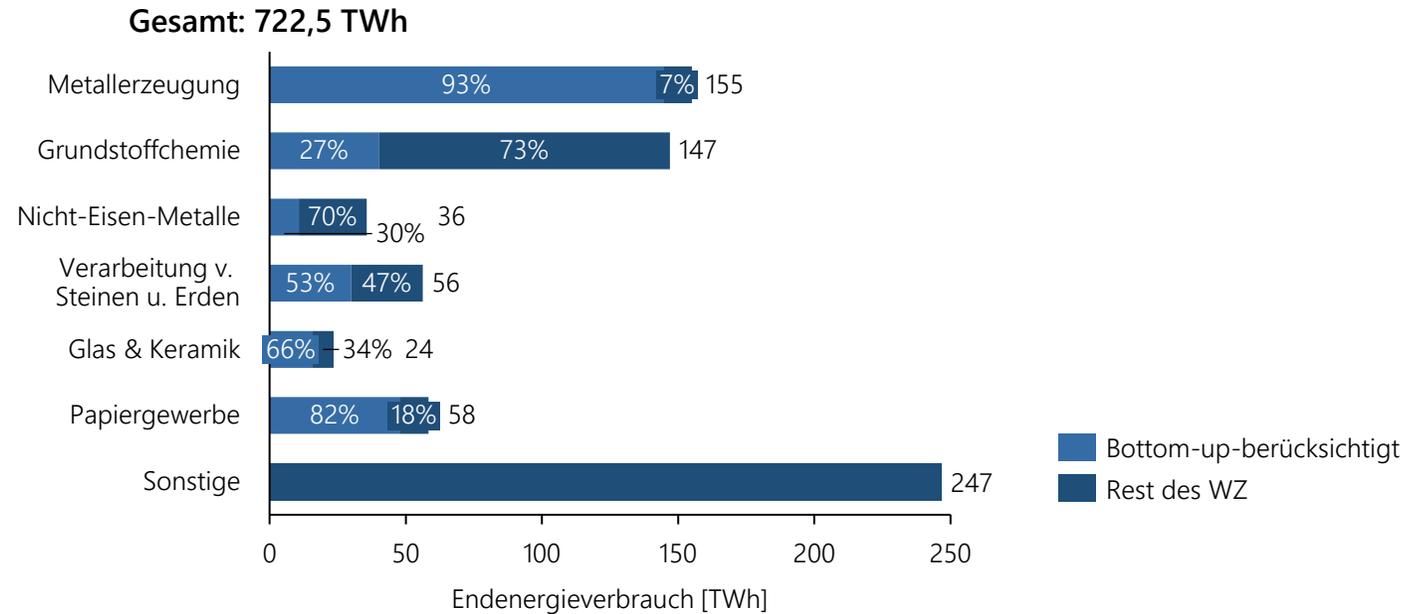


Auf Basis des Status quo wird für die beiden Extremszenarien maximal sinnvolle Elektrifizierung und maximal sinnvoller Wasserstoffeinsatz der Industrieverbräuche transformiert. Dabei unterscheidet sich die Transformation in eine detaillierte Variante auf der betrachteten Prozessebene und eine pauschale Variante für den restlichen Endenergieverbrauch (EEV) der Wirtschaftszweige. Als Eingangsdaten dienen neben den öffentlichen Bilanzen recherchierte Kennzahlen sowie Erfahrungswerte der FfE.

Für die Berechnung der Transformationspfade wird ein Excel-Tool aufgebaut. Zunächst werden alle Input-Parameter definiert und die verschiedenen Einheiten und die Aufteilung der Energieträger synchronisiert. Anschließend werden die betrachteten Prozesse und die Wirtschaftszweige getrennt und mit Hilfe der beiden Baselines transformiert. Die Baselines stellen dabei die Entwicklung des EEVs ohne Transformationstechnologien bis 2045 dar. Aus der Differenz der beiden Baselines lassen sich anschließend die Verbräuche der nicht-betrachteten Prozesse berechnen. Die nicht-betrachteten Prozesse werden je nach Anwendung durch bestimmte Elektrifizierungsmaßnahmen pauschal transformiert. Der Umwandlungssektor wird anhand der jeweils erzeugten fossilen Energieträger und deren Rückgang durch die Transformation ebenfalls transformiert.

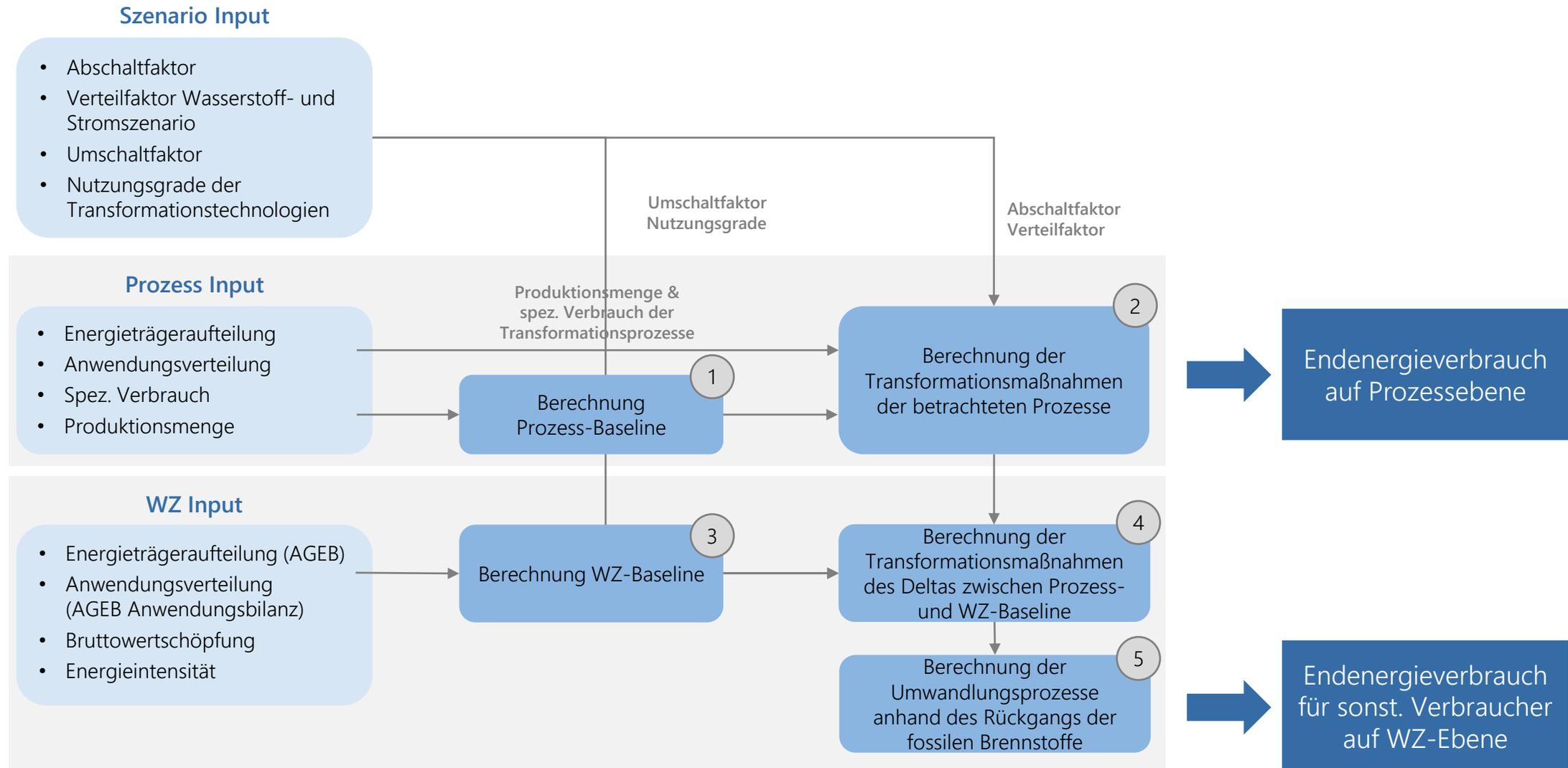
Die Ergebnisse der Transformationspfade werden als transformations- und nicht-transformationsbedingte (Baseline) Endenergieverbräuche an die Regionalisierung übergeben. Als gesondertes Ergebnis wird die Raumwärme berechnet.

Abdeckung des Endenergieverbrauchs durch das Industrietool



- Modellierung des gesamten deutschen Industrieverbrauchs
- Genaue Kenntnis der Technologiestruktur von ~80 % des Endenergieverbrauchs
 - davon ~40 % des Endenergieverbrauchs durch 19 bottom-up-berücksichtigte energieintensive Prozesse
 - ca. 40 % des EEV über Querschnittsmaßnahmen adressiert. Übrige 20 % durch vereinfachte Energieträgerumlage
 - Darüber hinaus nachgelagerte Berücksichtigung der Verbräuche im Umwandlungssektor

Aufbau des Transformationstools – Übersicht



Aufbau des Transformationstools – Beschreibung (I)

Schritt 1:

Der spez. Brennstoffverbrauch wird mit Hilfe der Energieträgeraufteilung auf die einzelnen Brennstoffe aufgeteilt und durch die Anwendungsverteilung je nach Prozess der entsprechenden Anwendung zugeteilt. Anschließend wird jeder berechnete Verbrauch mit der Gesamtproduktionsmengenentwicklung der Prozesse multipliziert. Als Ergebnis wird der Endenergieverbrauch eines Prozesses aufgeteilt in Anwendung und Energieträger berechnet.

Schritt 2:

Für die Berechnung der Transformationsmaßnahmen auf Prozessebene muss zum einen die Abschaltmenge der Produktionskapazität eines Prozesses über den Investitionszyklus bestimmt werden. Zum anderen muss die Abschaltmenge nach einem definierten Prozentsatz auf die Transformationstechnologien verteilt werden. Die Aufteilung der Technologien unterscheidet sich dabei je nach Szenario. Anschließend wird Schritt 1 für die Transformationstechnologien mit den entsprechenden Produktionsmengen (zuvor berechnete Abschaltmengen) wiederholt. Die Ausgangsprozesse werden dabei um die abgeschaltete Produktionsmenge reduziert. Als Ergebnis werden die Endenergieverbräuche eines Prozesses plus dessen Transformationsprozesse – in Anwendung und Energieträger aufgeteilt – berechnet.

Schritt 3:

Die Berechnung der WZ-Baseline erfolgt über die Entwicklung der Bruttowertschöpfung und der Energieintensität je Wirtschaftszweig. Diese werden miteinander multipliziert sowie der Endenergieverbrauch über die Energieträgeraufteilung und die Anwendungsbilanz der AGEB auf die jeweilige Anwendung und den Energieträger aufgeteilt.

Aufbau des Transformationstools – Beschreibung (II)

Schritt 4:

Aus der Differenz der Prozess- und WZ-Baseline lassen sich die nicht-betrachteten Prozesse herausrechnen. Diese Differenz wird je nach Anwendung pauschal durch eine vorgegebene Technologie elektrifiziert (z.B. Prozesswärme $<100\text{ °C}$ \rightarrow 100% Wärmepumpe). Hierfür wird der Endenergieverbrauch aller fossilen Energieträger eines Prozesses durch den Nutzungsgrad der Transformationstechnologie geteilt. Je nach Szenario und Anwendung unterscheiden sich die eingesetzten Transformationstechnologien durch den Umschaltfaktor, wodurch unterschiedliche Nutzungsgrade entstehen. Als Ergebnis erhält man den durch die Defossilisierung sinkenden fossilen Endenergieverbrauch der nicht betrachteten Prozesse und Wirtschaftszweige sowie den Endenergieverbrauch der Transformationsenergieträger aufgeteilt nach Anwendung und Energieträger.

Schritt 5:

Da jeder Energieträger für sich berechnet wurde, kann durch Addition aller Wirtschaftszweige die Entwicklung jedes Energieträgers nachgebildet werden. Für die Transformation des Umwandlungssektors wird, bezogen auf die Entwicklung des jeweiligen Energieträgers, der Rückgang des Endenergieverbrauchs des Umwandlungsprozesses berechnet (z.B. Raffinerie \rightarrow Entwicklung des Mineralöls).

Finales Ergebnis:

Aus der Endenergieverbrauchssumme der Prozess-Baseline, der Prozessmaßnahmen, der Maßnahmen der nicht-betrachteten Wirtschaftszweige und der Transformation des Umwandlungssektors errechnet sich das Endergebnis. Dabei gibt die Prozess-Baseline den nicht-transaktionsbedingten Endenergieverbrauch wieder.

Prozessinput – Übersicht über die spezifischen Prozessverbräuche (I)

Prozess	Technologie	Spez. Brennstoffverbrauch [MWh/t]	Spez. elektrischer Verbrauch [MWh/t]	Spez. stofflicher Verbrauch [MWh/t]
Aluminium	Schmelzflusselektrolyse	3,606	15,115	0
Aluminium	Innovative Elektrode	3,532	14,610	0
Ammoniak	Synthese	3,028	0,206	5,927
Ammoniak	Substitution Dampfreformierung	5,927	2,914	5,927
Flachglas	Schmelzprozess	2,583	0,917	0
Flachglas	Elektrowanne	0	2,035	
Flachglas	Wasserstoffwanne	2,583	0,830	0
Hohlglas	Schmelzprozess	1,611	0,389	0
Hohlglas	Elektrowanne	0	1,400	0
Hohlglas	Wasserstoffwanne	1,611	0,830	0
Holzstoff	Holzschliff & therm. Holzstoff	-1,100	2,425*	0
HVC	Steamcracker	9,972	0,621	12,041
HVC	MtO	15,478	1,389	15,478
HVC	MtA	23,769	1,389	23,769
HVC	Elektrischer Steamcracker	12,042	1,306	12,042
Kalk	Kalkbrennen	1,141	0,106	0
Kalk	Fuel Switch	1,141	0,106	0
Klinker	Klinkerbrennen	0,797	0,057	0
Klinker	Fuel Switch	0,797	0,057	0

Prozessinput – Übersicht über die spezifischen Prozessverbräuche (II)

Prozess	Technologie	Spez. Brennstoffverbrauch [MWh/t]	Spez. elektrischer Verbrauch [MWh/t]	Spez. stofflicher Verbrauch [MWh/t]
Kupfer	Oxid- & Sulfid-Kupfer	1,214	1,230	0
Kupfer	Fuel Switch	1,214	1,230	0
Methanol	Methanolsynthese	3,861	0,167	6,294
Methanol	Power-to-Methanol	6,294	2,344	6,294
Papiermaschine	Papiermaschine	1,528	0,475*	0
Papiermaschine	PtH	1,528	0,475*	0
Papiermaschine	Fuel Switch	1,528	0,475*	0
Primärstahl	Hochofen	4,502	0,079	0,135
Primärstahl	Hlsarna	2,661	0,046	0
Primärstahl	Direktreduktion	2,062	0,714	1,937
Sekundärstahl	Elektrischer Lichtbogenofen	0,131	0,533	0
Zellstoff	Zellstoffherstellung	3,722	0,600*	0
Zellstoff	PtH	3,722	0,600*	0
Zellstoff	Fuel Switch	3,722	0,600*	0
Zement	Zementmühle	-	0,054	0

* Werte wurden nach Rücksprache mit dem Verband der Papierindustrie angepasst.

Quellen: /FFE-39 20/, /GUM-02 21/

Prozessinput – Übersicht über die Energieträgeraufteilung (I)

Prozess	Technologie	Steinkohle	Braunkohle	Koks	Brenntorf	Anderere fossile Brennstoffe	Kokereigas	Gicht- u. Konvertergas	Heizöl	Erdgas	Erneuerbare	Biomasse	Abfall nicht Erneuerbare	Fernwärme	Wasserstoff
Aluminium	Schmelzfluss-elektrolyse					0,63%			5,81%	93,56%					
Aluminium	Innovative Elektrode									100%		6,44%			93,56%
Ammoniak	Synthese														
Ammoniak	Substitution Dampfpreformierung														
Flachglas	Schmelzprozess								9,35%	89,99%				0,76%	
Flachglas	Elektrowanne														100%
Flachglas	Wasserstoffwanne														100%
Hohlglas	Schmelzprozess								5,09%	94,85%				0,06%	
Hohlglas	Elektrowanne														
Hohlglas	Wasserstoffwanne														100%
Holzstoff	Holzschliff & Therm. Holzstoff	4,51%	3,86%						0,46%	49,45%		0,22%	0,06%	0,14%	
HVC	Steamcracker									100%					
HVC	MtO														
HVC	MtA														
HVC	Elektrischer Steamcracker														
Kalk	Kalkbrennen	13,96%	64,79%	3,34%						13,17%			4,74%		
Kalk	Fuel Switch											86,83%			13,17%
Klinker	Klinkerbrennen	8,42%	21,17%	3,7%					1,15%	0,51%		18,37%	46,68%		
Klinker	Fuel Switch											99,49%			0,51%

Prozessinput - Übersicht über die Energieträgeraufteilung (II)

Prozess	Technologie	Steinkohle	Braunkohle	Koks	Brenntorf	Anderere fossile Brennstoffe	Kokereigas	Gicht- u. Konvertergas	Heizöl	Erdgas	Erneuerbare	Biomasse	Abfall nicht Erneuerbare	Fernwärme	Wasserstoff
Kupfer	Oxid & Sulfid Kupfer			3,66%					0,15%	95,58%			0,61%		
Kupfer	Fuel Switch											4,42%			95,58%
Methanol	Methanolsynthese								60%	40%					
Methanol	Power-to-Methanol														
Papiermaschine	Papiermaschine	4,51%	3,86%						0,46%	49,44%		21,91%	5,82%	14%	
Papiermaschine	PtH*											36,56%		14%	
Papiermaschine	Fuel Switch											36,56%		14%	49,44%
Primärstahl	Hochofen	28,56%		56,3%											
Primärstahl	Hlsarna												77,25%		22,74%
Primärstahl	Direktreduktion												13,77%		86,23%
Sekundärstahl	Elektrischer Lichtbogenofen												36,55%		63,45%
Zellstoff	Zellstoffherstellung	4,51%	3,82%						0,47%	49,52%		21,91%	5,79%	13,99%	
Zellstoff	PtH*											36,51%		13,99%	
Zellstoff	Fuel Switch											36,51%		13,99%	49,52%

* In diesem Sonderfall wird der fehlende Anteil zur Elektrischen Energie hinzugerechnet, da die PtH-Technologie fossile Energieträger je nach Prozesstemperatur direkt ersetzt. Die dafür verwendeten Wirkungsgrade sind auf der Folie Effizienzsteigerung dargestellt.

Quelle: /GUM-02 21/

Prozessinput – angenommene jährliche Effizienzfortschritte (I)

Prozess	Technologie	Steigerung Brennstoffeffizienz	Extremes Elektrifizierungsszenario	Steigerung elektrische Effizienz	Extremes Elektrifizierungsszenario
Aluminium	Schmelzflusselektrolyse	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Aluminium	Innovative Elektrode	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Ammoniak	Synthese	1,3%	0,2%	1,0%	0,2%
Ammoniak	Substitution Dampfreformierung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Flachglas	Schmelzprozess	0,4%	0,2%	2,0%	0,2%
Flachglas	Elektrowanne	0,4%	0,2%	0,0%	0,0%
Flachglas	Wasserstoffwanne	0,4%	0,2%	2,0%	0,2%
Hohlglas	Schmelzprozess	0,4%	0,2%	0,0%	0,0%
Hohlglas	Elektrowanne	0,3%	0,2%	0,7%	0,2%
Hohlglas	Wasserstoffwanne	1,3%	0,2%	1,0%	0,2%
Holzstoff	Holzschliff & therm. Holzstoff	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HVC	Steamcracker	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HVC	MtO	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HVC	MtA	1,1%	0,2%	0,7%	0,2%
HVC	Elektrischer Steamcracker	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Kalk	Kalkbrennen	1,3%	0,2%	1,1%	0,2%
Kalk	Fuel Switch	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Klinker	Klinkerbrennen	0,3%	0,2%	0,3%	0,2%
Klinker	Fuel Switch	0,3%	0,2%	0,3%	0,2%

Prozessinput – angenommene jährliche Effizienzfortschritte (II)

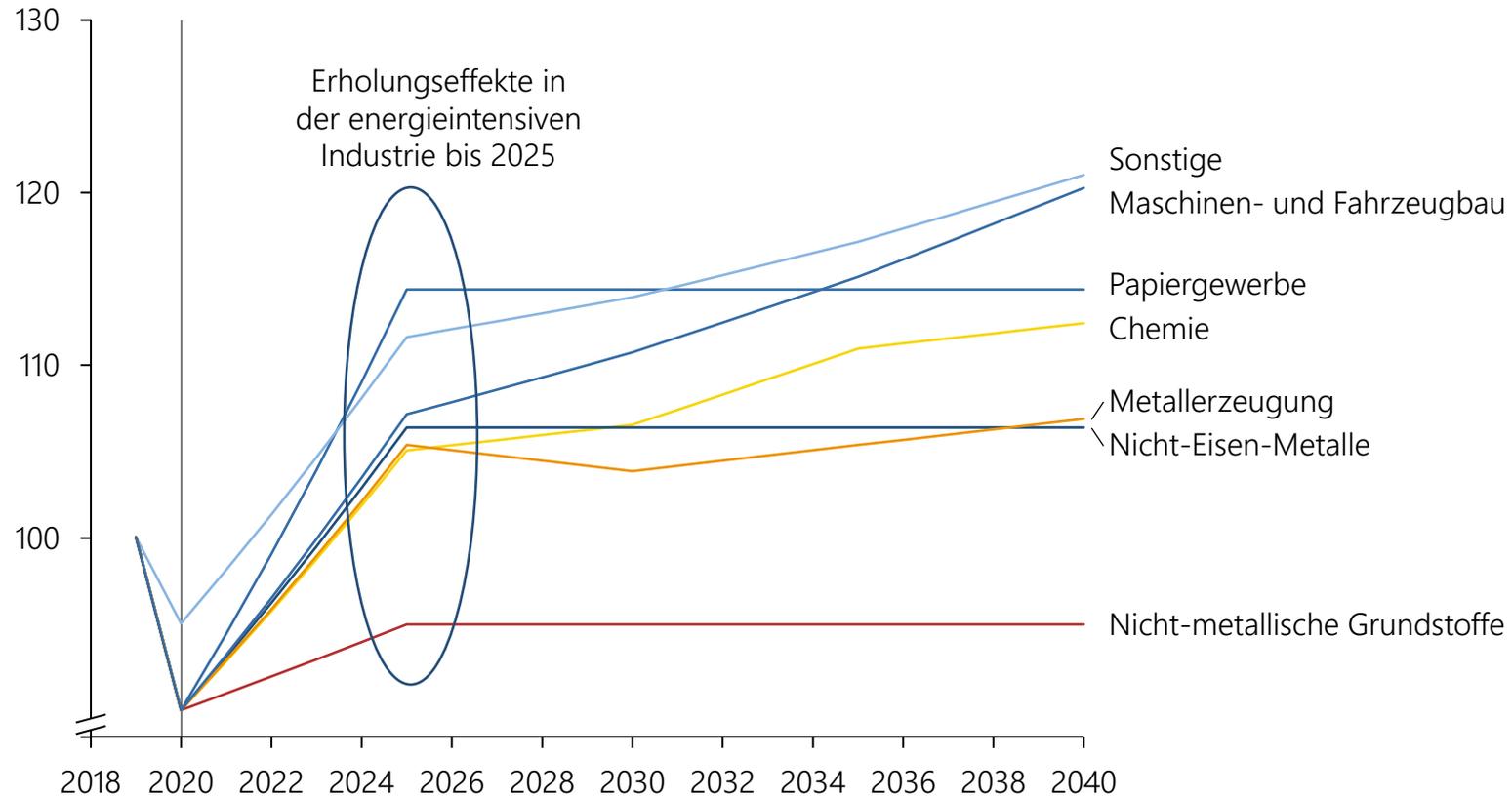
Prozess	Technologie	Steigerung Brennstoff- effizienz	Extremes Elektrifizierungs- szenario	Steigerung elektrische Effizienz	Extremes Elektrifizierungs- szenario
Kupfer	Oxid & Sulfid-Kupfer	0,3%	0,2%	0,3%	0,2%
Kupfer	Fuel Switch	0,3%	0,2%	0,3%	0,2%
Methanol	Methanolsynthese	1,3%	0,2%	1,0%	0,2%
Methanol	Power-to-Methanol	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Papiermaschine	Papiermaschine	0,7%	0,2%	1,1%	0,2%
Papiermaschine	PtH	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Papiermaschine	Fuel Switch	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Primärstahl	Hochofen	0,5%	0,2%	0,6%	0,2%
Primärstahl	Hlsarna	0,5%	0,2%	0,6%	0,2%
Primärstahl	Direktreduktion	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sekundärstahl	Elektrischer Lichtbogenofen	0,0%	0,0%	0,3%	0,2%
Zellstoff	Zellstoffherstellung	0,3%	0,2%	0,7%	0,2%
Zellstoff	PtH	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Zellstoff	Fuel Switch	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Zement	Zementmühle	-	-	1,1%	0,2%

Wirtschaftszweiginput – angenommene jährliche Effizienzfortschritte

Wirtschaftszweig	Effizienzsteigerung der Energieintensität	Extremes Elektrifizierungsszenario
Gew. v. Steinen u. Erden	0,7%	0,2%
Ernährung und Tabak	0,7%	0,2%
Papiergewerbe	0,7%	0,2%
Grundstoffchemie	0,7%	0,2%
Sonst. Chemische Industrie	0,7%	0,2%
Gummi- u. Kunststoffwaren	0,7%	0,2%
Glas & Keramik	0,7%	0,2%
Verarb. v. Steinen u. Erden	0,7%	0,2%
Metallerzeugung	0,7%	0,2%
NE-Metalle, -gießereien	0,7%	0,2%
Metallbearbeitung	0,7%	0,2%
Maschinenbau	0,7%	0,2%
Fahrzeugbau	0,7%	0,2%
Sonst. verarbeitendes Gewerbe	0,7%	0,2%

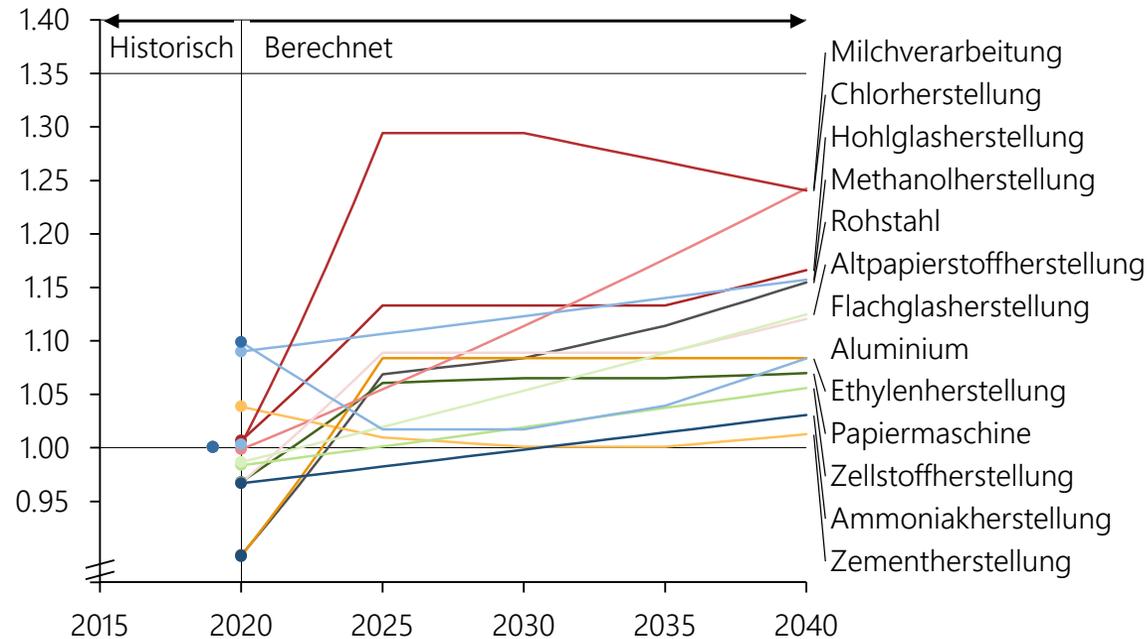
Wirtschaftszweiginput – moderates jährliches Wachstum der Bruttowertschöpfung

Bruttowertschöpfung
(2019 = 100)

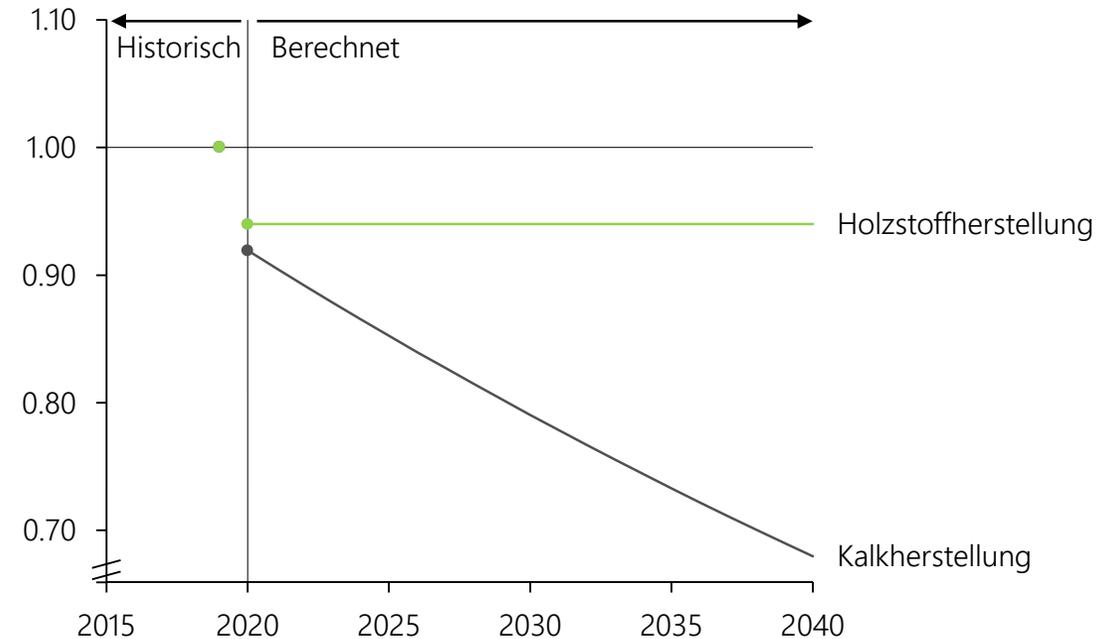


Prozessinput – moderates jährliches Wachstum der Produktionsmenge

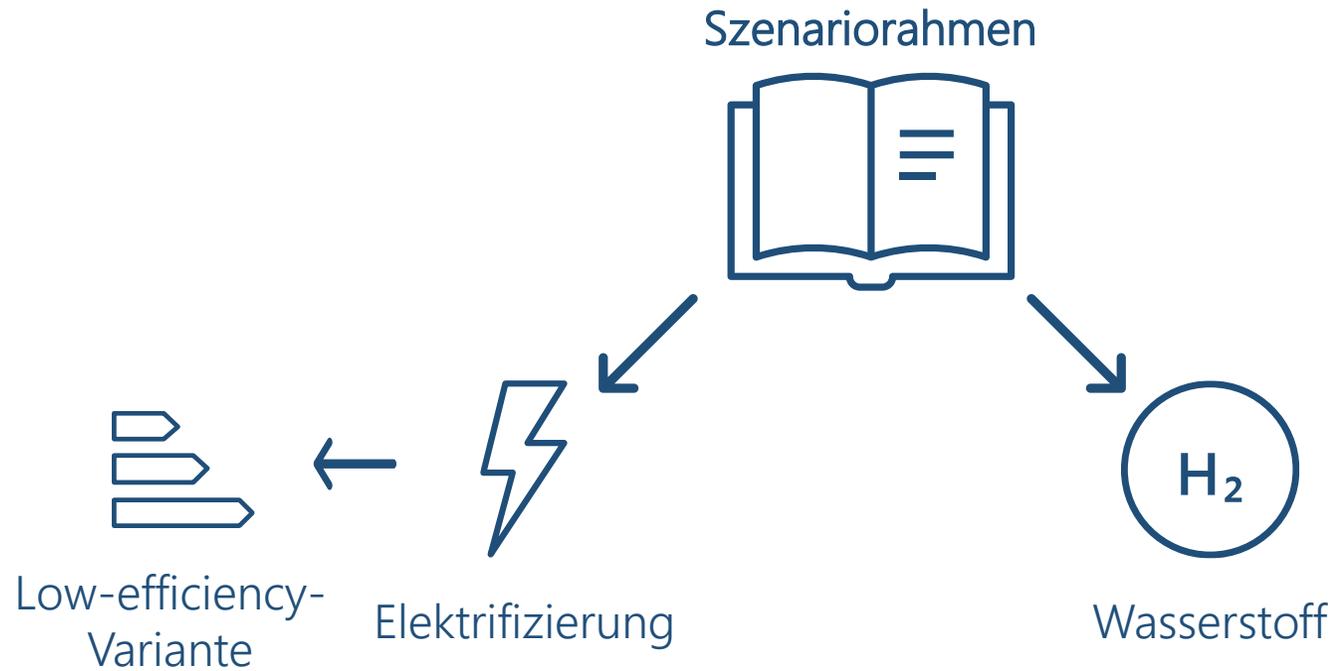
Produktionsindex
(2019 = 100)



Produktionsindex
(2019 = 100)



Der Projekt-Szenariobaum hat zwei Äste – Elektrifizierung und Wasserstoff



- Es werden 2 Szenarien „max. Elektrifizierung“ und „max. H₂“ sowie eine „Low-efficiency-Variante“ des Elek.szenarios berechnet.
- In den Hauptszenarien werden keine komplett „extremen“ Entscheidungen getroffen.
 - Beide Szenarien lösen sich nicht von technischen Erkenntnissen, die in vergangenen Forschungsprojekten gesammelt wurden.
 - In beiden Szenarien spielt der „andere“ Energieträger nach wie vor eine tragende Rolle.
- Eckdaten zur Wirtschaft und den Effizienzmaßnahmen sind in beiden Szenarien identisch.
- Die Regionalisierungslogik ist szenarioübergreifend einheitlich, es findet keine Industrieverlagerung statt.

Kurzbeschreibung Elektrifizierungsszenario

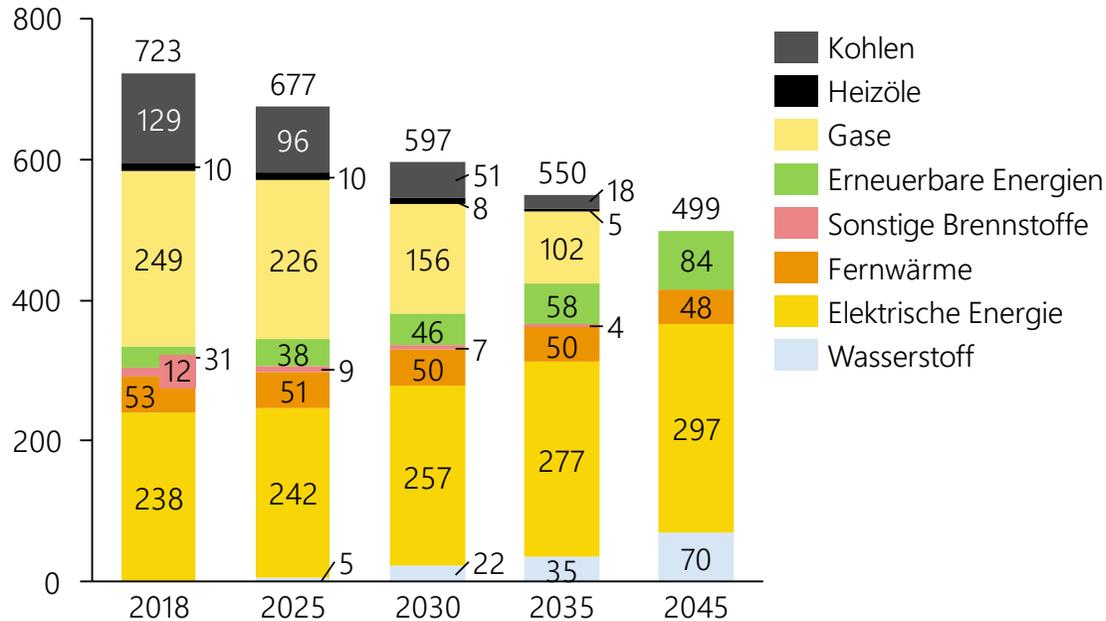
Anwendung	Kurzbeschreibung					
	Stahl: Vollständiger phase-out der Hochofenroute schon vor dem Zieljahr. Ausweitung der Sekundärherstellung ab Startjahr bis an die Grenze der Schrottvfügbarkeit. Restliche Mengen über die DRI-EAF Route.	Heute	Heute/2025	2025	2030	
	Ammoniak: Power-to-Ammoniak ab technischer Reife. HVC: Umstieg auf MTO/MTA-Routen ab 2025 bis 2035. Vollständige Substitution stillgelegter Mengen mit E-cracker ab 2035. Methanol: Power-to-Methanol ab technischer Reife. CC für MeOH-Synthese.	Heute	2035	2025	2030	2025
	Zement & Kalk: Einsatz biogener Abfälle und alternativer Brennstoffe wo möglich. Restliche Mengen CH ₄ werden durch H ₂ ersetzt. Der Einsatz der CO ₂ -Abscheidung ist Grundvoraussetzung für Treibhausgasneutralität.	Heute		2030	2030	2030
	Alu: Einsatz innovativer Elektroden zur Verminderung der Prozessemissionen. Kupfer: Substitution fossiler BS durch H ₂ . Papier: Elektrifizierung der Niedertemperaturprozesswärme. Glas: Elektrifizierung der Schmelzwannen.	Heute	Heute/2030	2030	2030	2030
	Querschnittstechnologien: Inkrementelle Effizienzverbesserung bei allen Stromverbrauchern. 100% Elektrifizierung f. <200 °C mit COP=3, 75% Elektrifizierung mit COP=1,5 f. 200°C – 500 °C und 25% Elektrifizierung mit COP = 1 f. >500°C. Substitution CH ₄ mit H ₂ -Brennern & feste fossile KW mit Biomasse.	heute	2025	2030	2030	

Kurzbeschreibung Wasserstoffszenario

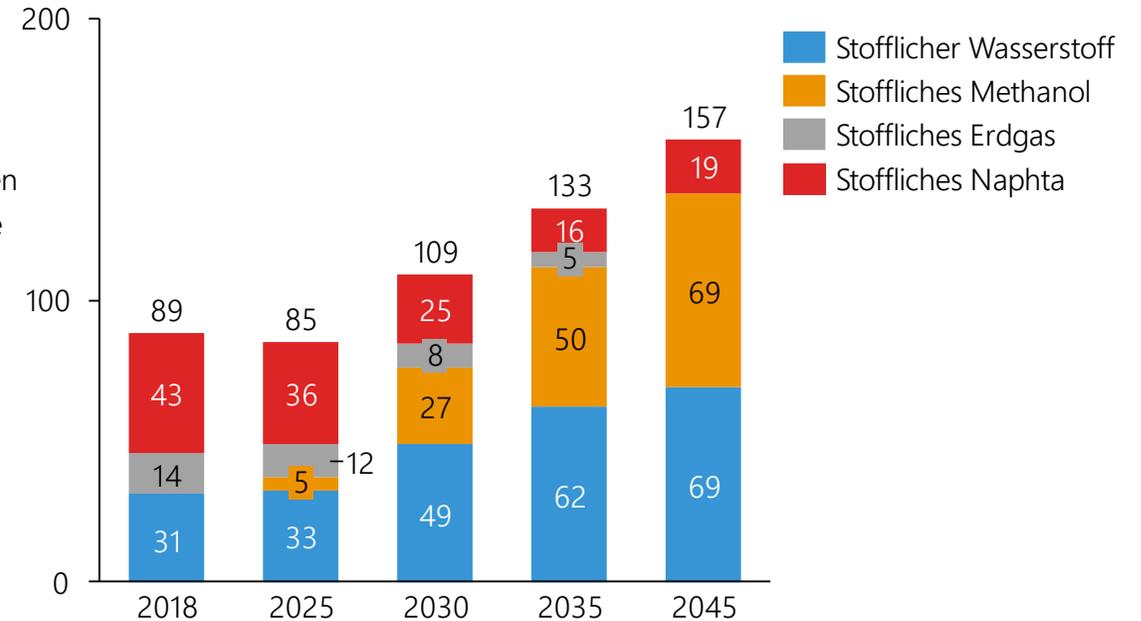
Anwendung	Kurzbeschreibung					
	Stahl: Vollständiger phase-out der Hochofenroute schon vor dem Zieljahr. Konstante Sekundärherstellung. Restliche Mengen über die DRI-EAF Route mit Hochlaufbeginn 2025. Biomasse aus metallurgischen Gründen.	Heute		2025	2030	
	Ammoniak: Power-to-Ammoniak ab technischer Reife. HVC: Umstieg auf MTO/MTA-Routen ab 2025, kein Electrocracker. Methanol: Power-to-Methanol ab technischer Reife, CC für MeOH-Synthese.	Heute		2025	2030	2025
	Zement & Kalk: Einsatz biogener Abfälle und alternativer Brennstoffe wo möglich. Restliche Mengen CH ₄ werden durch H ₂ ersetzt. Der Einsatz der CO ₂ -Abscheidung ist Grundvoraussetzung für Treibhausgasneutralität.	Heute		2030	2030	2030
	Alu: Einsatz innovativer Elektroden zur Verminderung der Prozessemissionen Kupfer: Substitution fossiler BS durch H ₂ . Papier: Substitution fossiler BS durch H ₂ . Glas: Substitution fossiler BS durch H ₂ .	Heute		2030	2030	2030
	Querschnittstechnologien: Inkrementelle Effizienzverbesserung bei allen Stromverbräuchen. 50% Elektrifizierung f. <200 °C mit COP=3, 30% Elektrifizierung mit COP=1,5 f. 200°C – 500 °C und 10% Elektrifizierung mit COP = 1 f. >500°C. Substitution CH ₄ mit H ₂ -Brennern & feste fossile KW mit Biomasse.	Heute	2025	2030	2030	

Elektrifizierungsszenario – Nicht- und energetischer Endenergieverbrauch in der Industrie

Endenergieverbrauch nach Energieträgern
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Nichtenergetischer Verbrauch
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



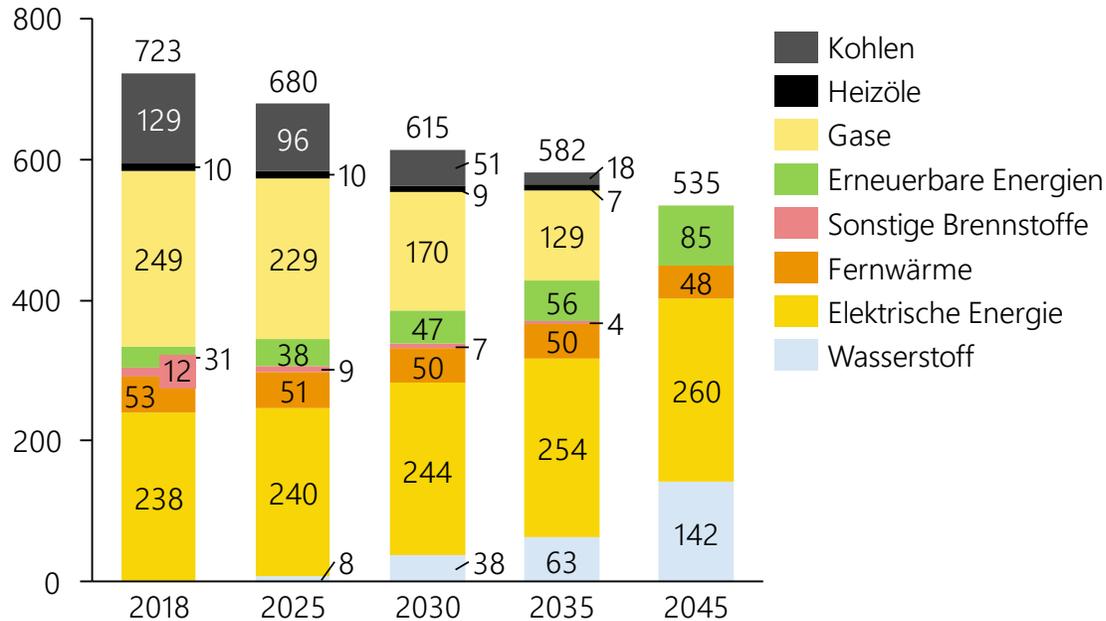
Kernaspekte

- Bis 2025 v.a. Effizienzmaßnahmenumsetzung
- Beginn tiefgreifender Transformation ab 2025
- Kohleausstieg vor 2045
- Haupttreiber für Strom- und Wasserstoffverbrauch sind sowohl innovative Verfahrensrouten als auch Elektrifizierung und Brennertausch auf allen Temperaturniveaus

- Treiber der stofflichen Verbräuche sind v.a. Ammoniak, HVC und Methanol
- Naphtha auch 2045 noch als Einsatzstoff für den E-cracker relevant
- Grundsätzliche Fragestellung: make-or-buy des feedstocks

Wasserstoffszenario – Nicht- und energetischer Endenergieverbrauch in der Industrie

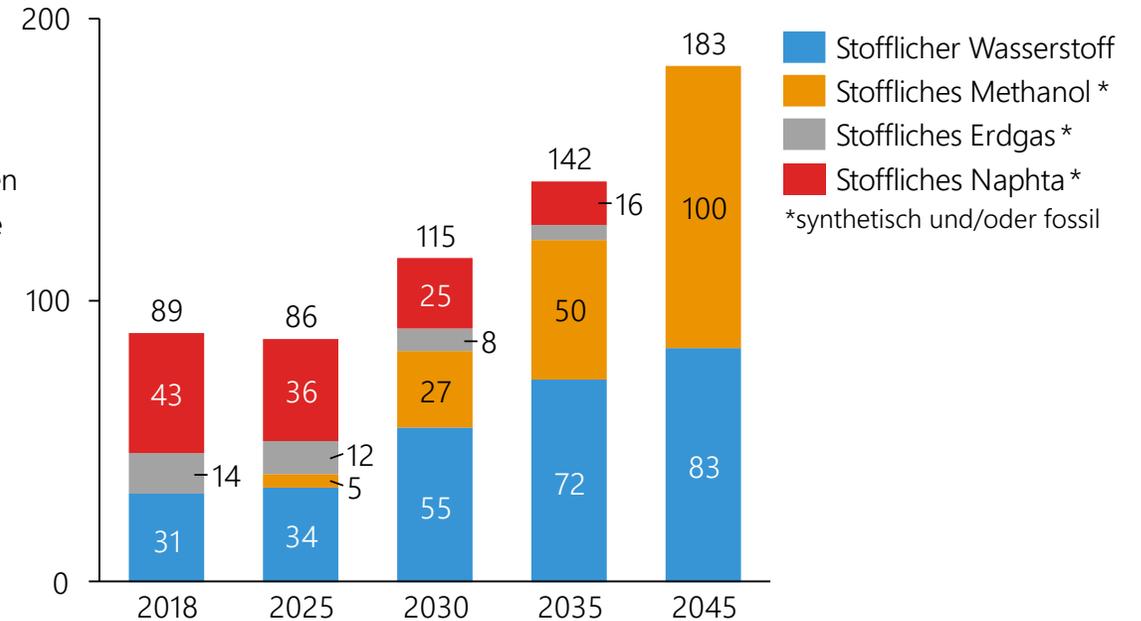
Endenergieverbrauch nach Energieträgern
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario



Kernaspekte

- Bis 2025 v.a. Effizienzmaßnahmenumsetzung
- Beginn tiefgreifender Transformation ab 2025, hier bereits geringfügiger Mehrverbrauch im Vergleich zum Elek.-Szenario
- Haupttreiber für zusätzlichen Wasserstoffverbrauch sind die Stahlherstellung und Wasserstoffbrenner im NT-PW-Bereich

Nichtenergetischer Verbrauch
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

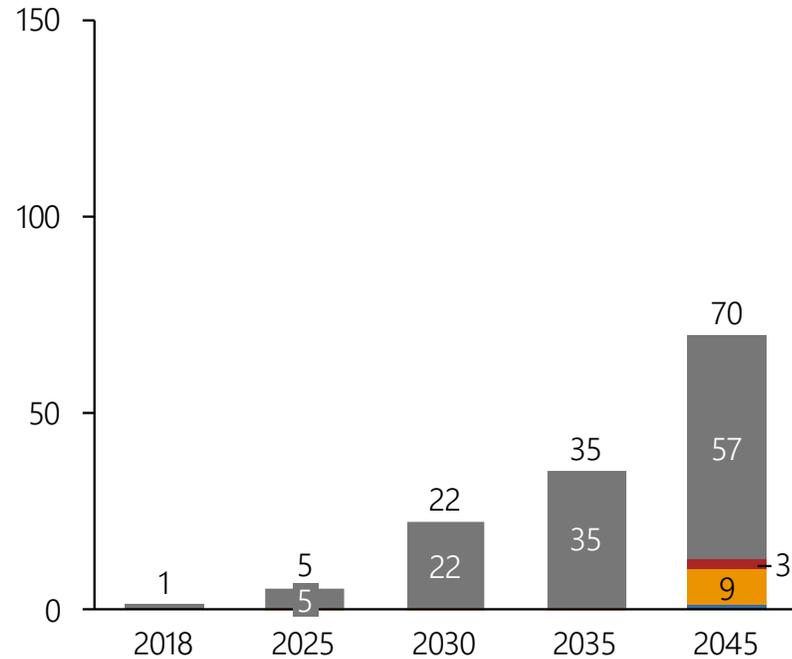


Kernaspekte

- Treiber der stofflichen Verbräuche sind v.a. Ammoniak, HVC und Methanol
- Kein Einsatz des E-crackers, daher kein Naphtha im Zieljahr
- Grundsätzliche Fragestellung make-or-buy des feedstocks hier noch dominanter

Der Blick auf Wasserstoff – Wasserstoffverbrauch in Industrie und Umwandlungssektor

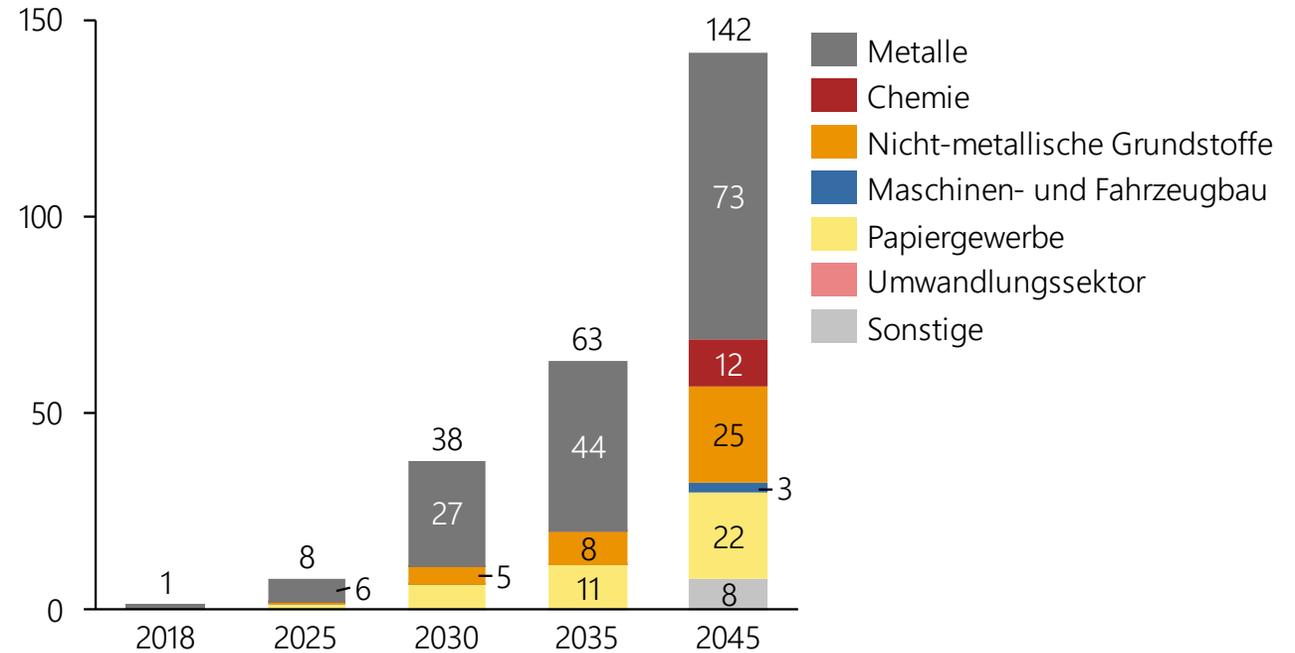
Wasserstoffverbrauch nach Wirtschaftszweigen
in TWh energetisch | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Stahl dominiert auch als energetischer Wasserstofftreiber im Elektrifizierungsszenario.
- Beginn tiefgreifender Transformation ab 2025.
- Haupttreiber für zusätzlichen Wasserstoffverbrauch sind die Stahlherstellung und Wasserstoffbrenner im NT-PW-Bereich.

Wasserstoffverbrauch nach Wirtschaftszweigen
in TWh energetisch | Deutschland | Wasserstoffszenario

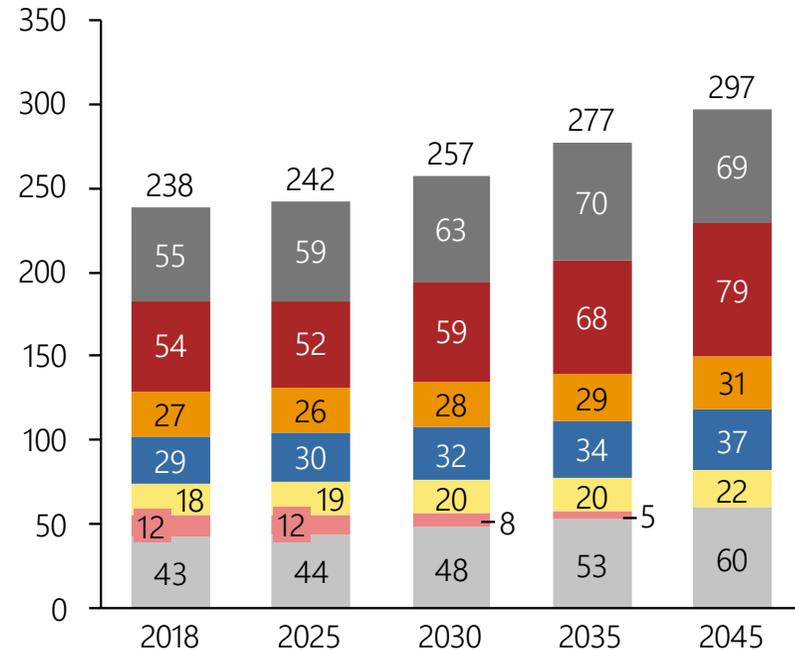


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario verstärkt sich auch die energetische Nutzung des H₂ bei der Stahlherstellung.
- Darüber hinaus wird der H₂-Verbrauch auch in typischen Niedertemperaturbranchen sichtbar.
- Beginn tiefgreifender Transformation ab 2025, hier bereits geringfügiger Mehrverbrauch im Vergleich zum Elek.-Szenario.

Der Blick auf Strom – Stromverbrauch in Industrie und Umwandlungssektor

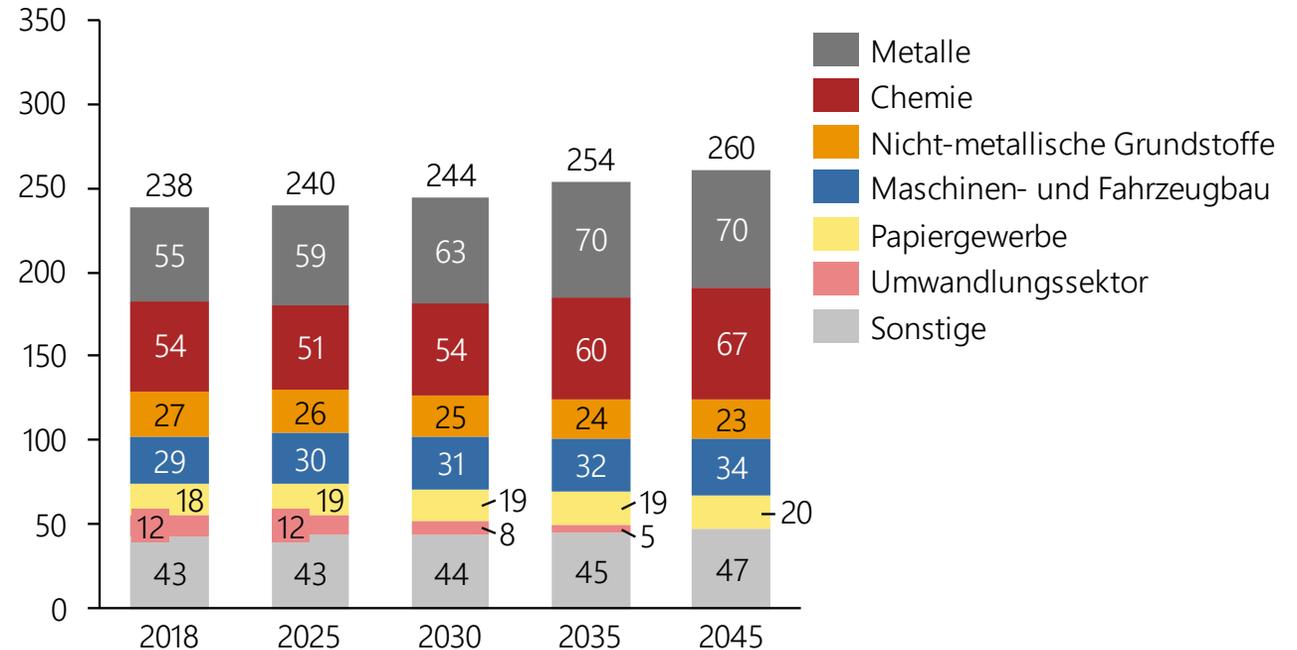
Stromverbrauch nach Wirtschaftszweigen
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Der Stromverbrauch steigt in allen Wirtschaftszweigen bis 2045.
- Treiber sind die Prozesstransformation und die Elektrifizierung der Nieder- und Mitteltemperatur sowie Teile der Hochtemperatur.
- Stromeffizienz grenzt den Verbrauchsanstieg ein.

Stromverbrauch nach Wirtschaftszweigen
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

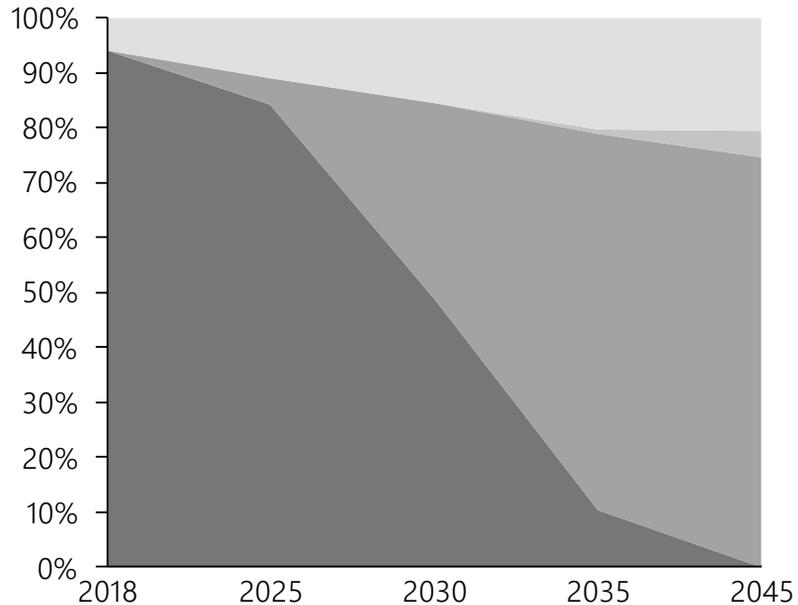


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario stagniert die Stromnutzung auf dem heutigen Niveau
- In einigen Branchen, in denen Nieder- und Mitteltemperatur stark ausgeprägt ist oder Prozesse nach wie vor elektrifiziert werden, kommt es dennoch zu einem Verbrauchsanstieg
- Auch hier spielt der Umwandlungssektor am Ende keine Rolle mehr

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Prozessaufteilung des Endenergieverbrauchs der Metallerzeugung

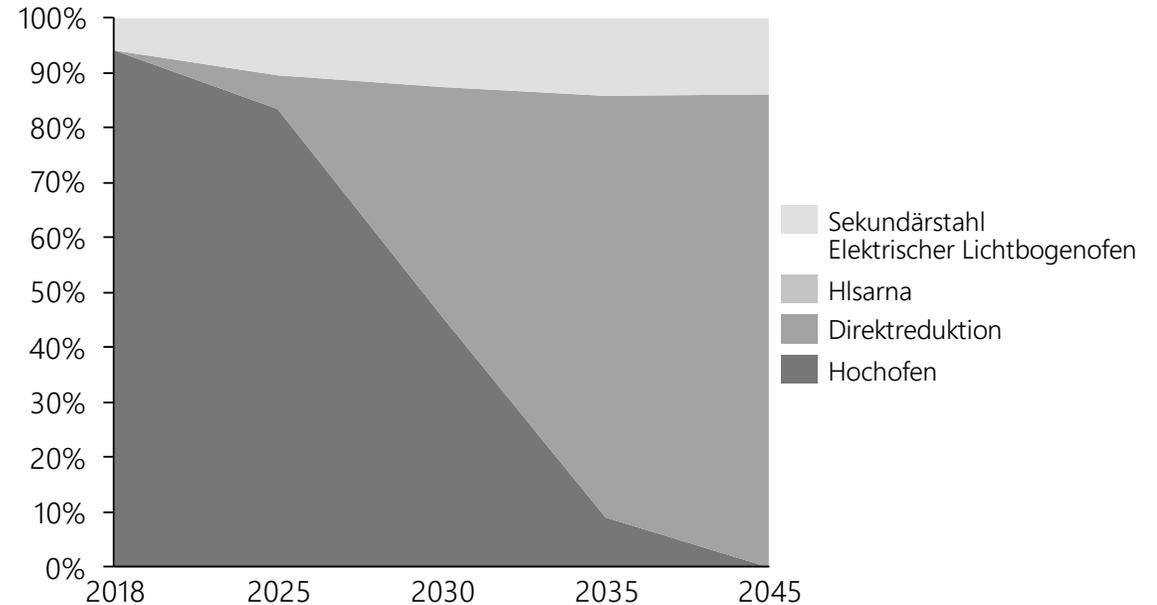
Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Metallerzeugung
in % | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Die Hochofenroute bestimmt mit 94% im Jahr 2018 die Stahlproduktion. Im Jahr 2045 werden 75% durch die Direktreduktion, 21% durch den Lichtbogenofen und 4% durch den Hisarna-Prozess hergestellt.
- Wird am Anfang die Transformation durch Sekundärstahl vorangetrieben, müssen ab 2025 große Mengen durch die Direktreduktion ersetzt werden.

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Metallerzeugung
in % | Deutschland | Wasserstoffszenario

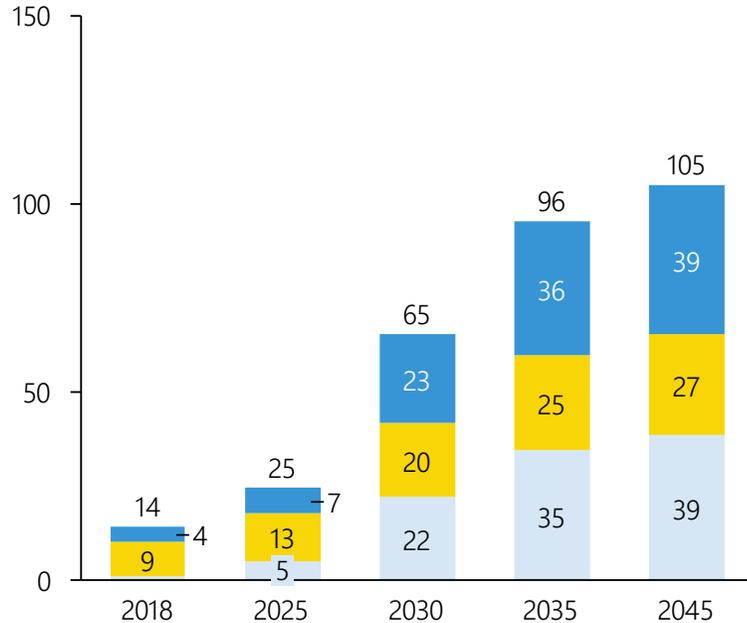


Kernaspekte

- Wie bei der Elektrifizierung bestimmt die Direktreduktion mit 86% die Transformation im Jahr 2045.
- Der Hisarna-Prozess spielt im Wasserstoffszenario keine Rolle
- Insgesamt ist durch die begrenzten Kapazitäten an recyceltem Stahl für die Sekundärroute und die späte Marktreife des Hisarna-Prozess die Direktreduktion dominierend

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Metallerzeugung

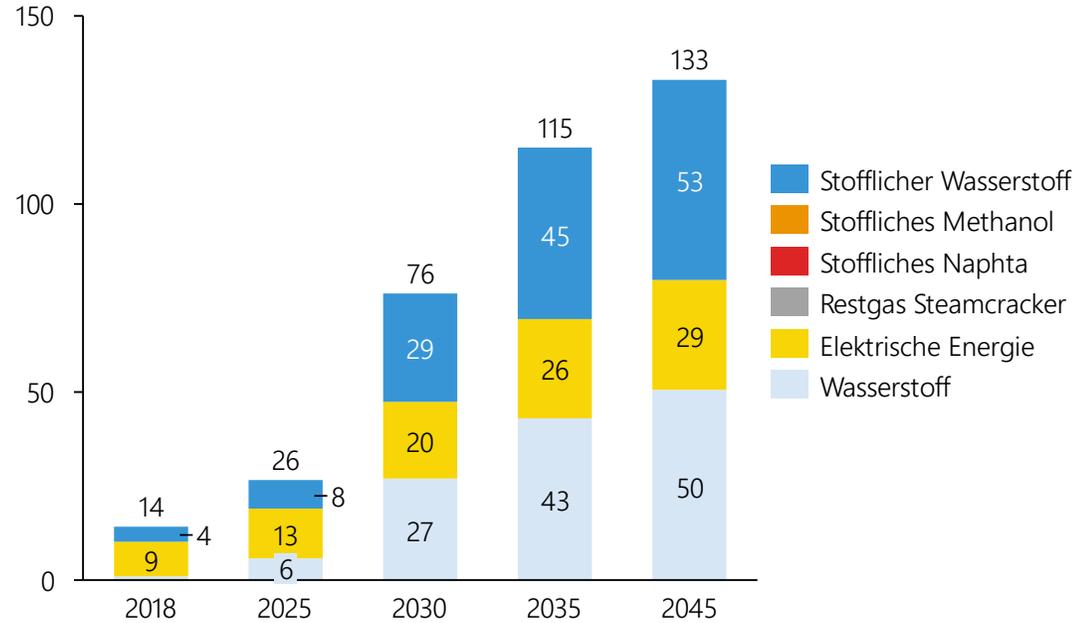
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Primär- & Sekundärstahl
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Durch die höhere Effizienz des Hisarna-Prozesses ist der elektrische Verbrauch geringer als im Wasserstoffszenario.
- Der hohe Anteil der Direktreduktion führt zu einem hohen Verbrauch von Wasserstoff und stofflichem Wasserstoff.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Primär- & Sekundärstahl
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

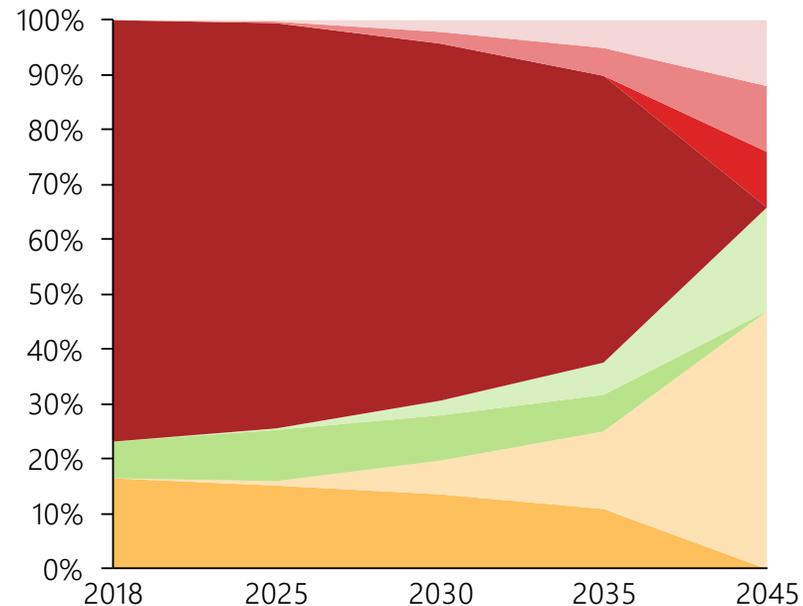


Kernaspekte

- Die Direktreduktion benötigt neben Wasserstoff für die Aufbereitung des Eisenschwammes ebenfalls elektrische Energie, welche zu einem erhöhtem Verbrauch im Szenario führt.
- Im Vergleich zu allen betrachteten Prozessen entsteht in der Stahlerzeugung durch die Transformation ein sehr hoher Bedarf an den betrachteten Energieträgern.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffscenario – Prozessaufteilung des Endenergieverbrauchs der Grundstoffchemie

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Grundstoffchemie
in % | Deutschland | Elektrifizierungsszenario

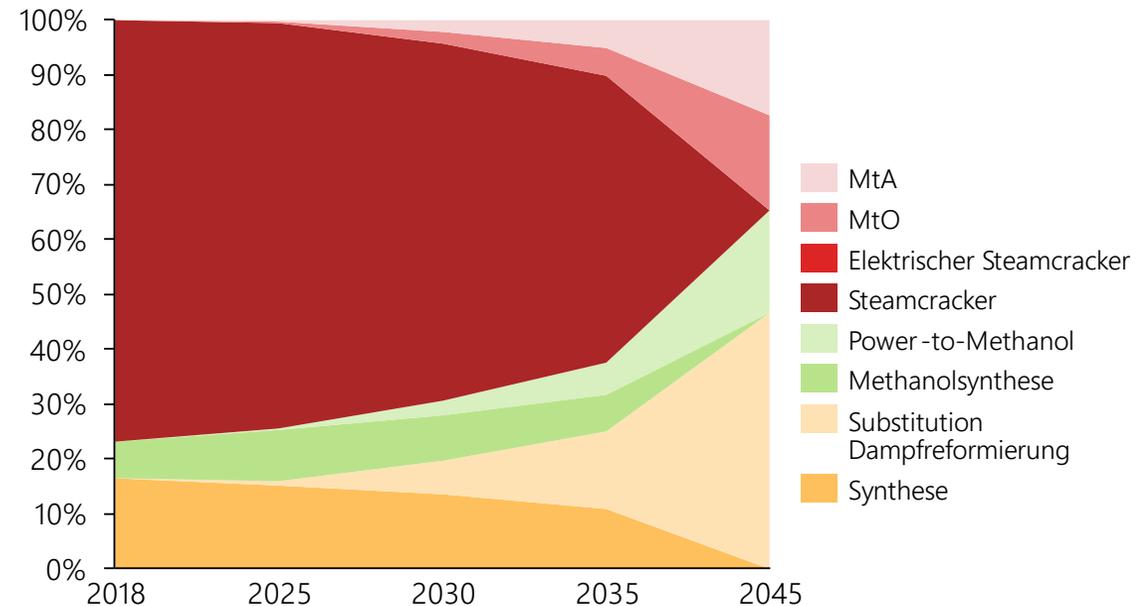


Kernaspekte

- Mit 77% bestimmt der HVC-Prozess den Endenergieverbrauch. Methanol mit 7% und Ammoniak mit 16% machen einen geringeren Anteil aus.
- Durch die energetische Effizienzsteigerung und die Verlagerung des Gesamtenergiebedarfs in die nicht-energetischen Energieträger bei HVC steigt der prozentuale Anteil der beiden anderen Technologie am Gesamtenergieverbrauch.

Abschlussbericht

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Grundstoffchemie
in % | Deutschland | Wasserstoffscenario

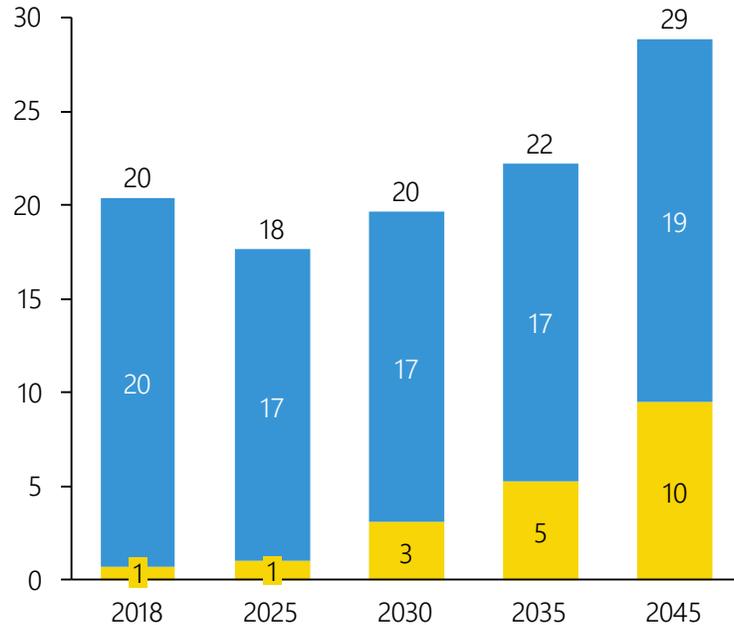


Kernaspekte

- Power-to-Methanol und die Substitution der Dampfreformierung werden als einzige marktfähige Technologien für die Transformation angenommen.
- Der elektrische Steamcracker wird im Wasserstoffscenario vernachlässigt und durch Methanol-to-Aromatics und Methanol-to-Olefins ersetzt.
- Für alle Technologien gilt durch die relativ späten Investitionszyklen, dass erst ab ca. 2030 die Transformation beginnen kann.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Ammoniakherstellung

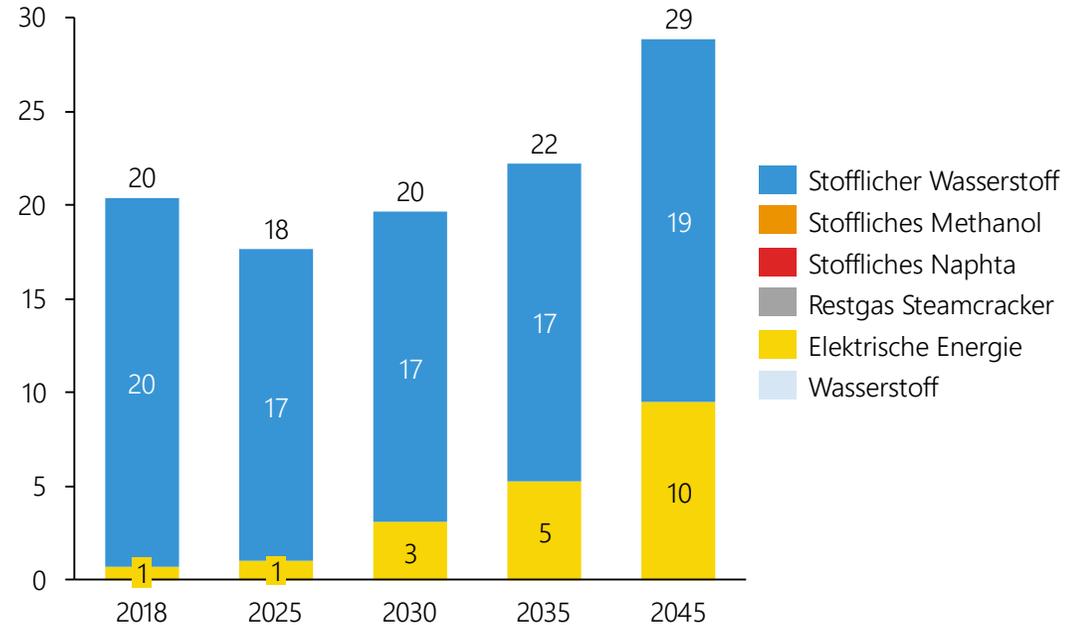
Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Ammoniak
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Die Transformationstechnologie des Ammoniaks hat einen höheren spez. Stromverbrauch, dadurch steigt der elektrische Verbrauch bis 2045 an.
- Der stoffliche Verbrauch sinkt durch die allgemeine Effizienzsteigerung etwas ab.

Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Ammoniak
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

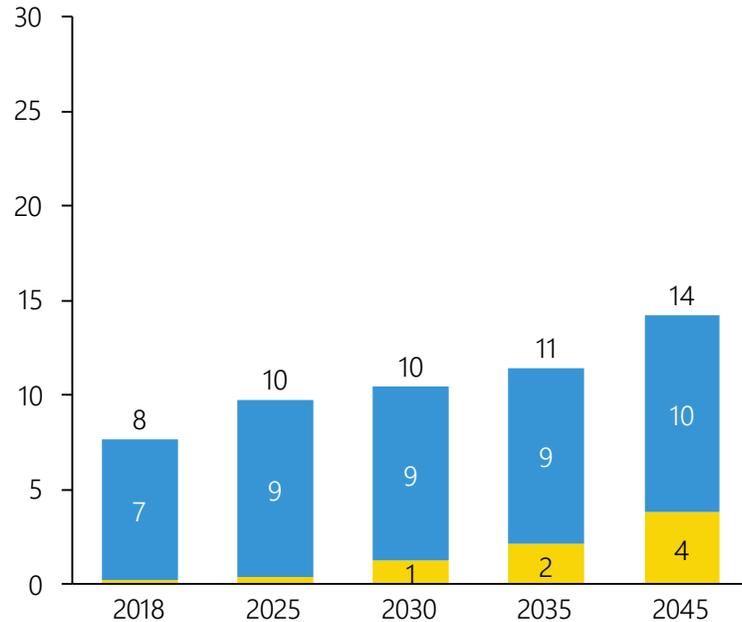


Kernaspekte

- Da die Substitution der Dampfpreformierung als einzige realistisch umsetzbare Technologie angenommen wird, sind beide Szenarien identisch.
- Eine weitere denkbare Technologieoption ist die Methanpyrolyse, die ab ca. 2035 eine Rolle in der Transformation spielen kann, hier jedoch nicht betrachtet wird.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Methanolherstellung

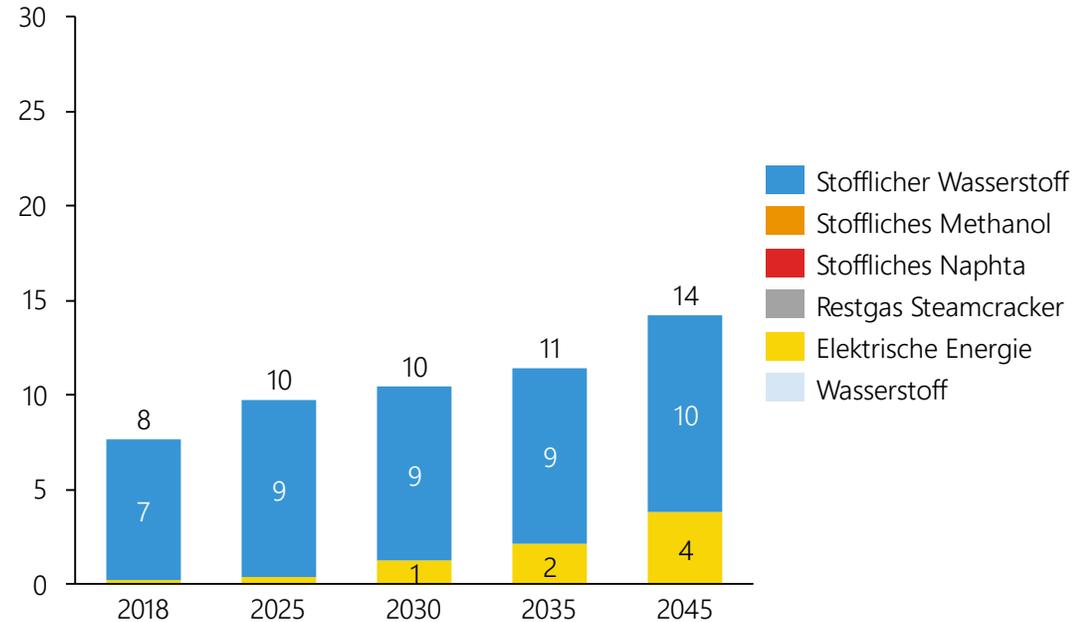
Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Methanol
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Power-to-Methanol setzt im Gegensatz zur klassischen Methanolsynthese elektrische Energie als Energieträger ein. Folglich steigt der elektrische Energieverbrauch durch die Transformation.
- Der stoffliche H₂-Bedarf nimmt ebenfalls zu, Grund hierfür ist die Produktionsmengenentwicklung.

Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Methanol
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

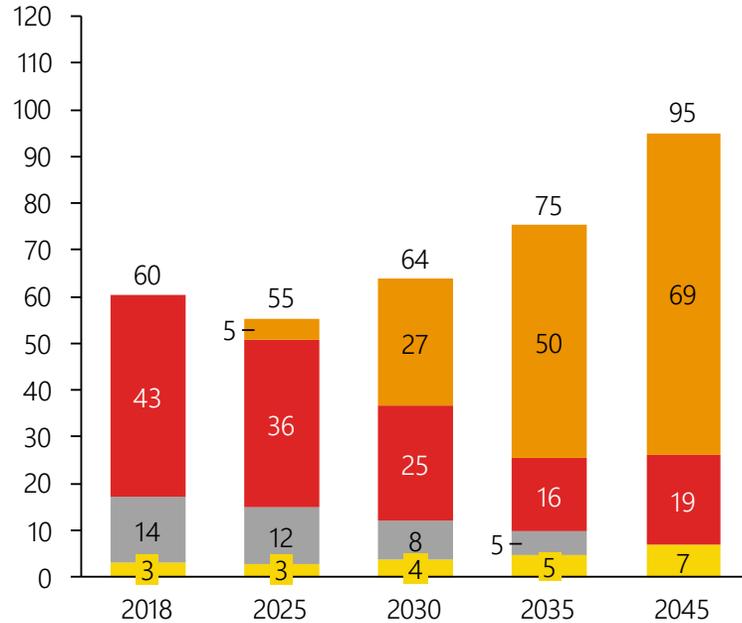


Kernaspekte

- Power-to-Methanol wird als einzige Transformationstechnologie eingesetzt -> Elektrifizierungs- = Wasserstoffszenario.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der HVC-Produktion

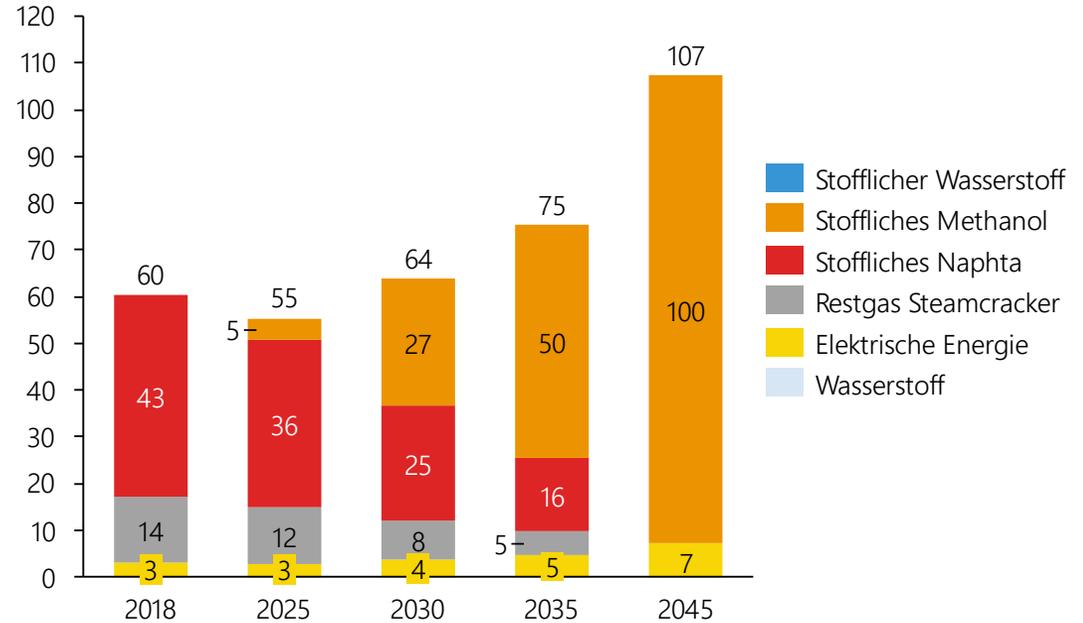
Strom-, H2- und Derivateverbrauch HVC
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Durch die Transformation werden stoffliches Naphta und Erdgas zum Teil durch Methanol ersetzt.
- Der elektrischer Steamcracker besitzt weiterhin einen Naphta-Bedarf.
- Es findet insgesamt eine leichte Elektrifizierung durch den erhöhten spez. Strombedarf der Transformationstechnologien statt.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch HVC
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

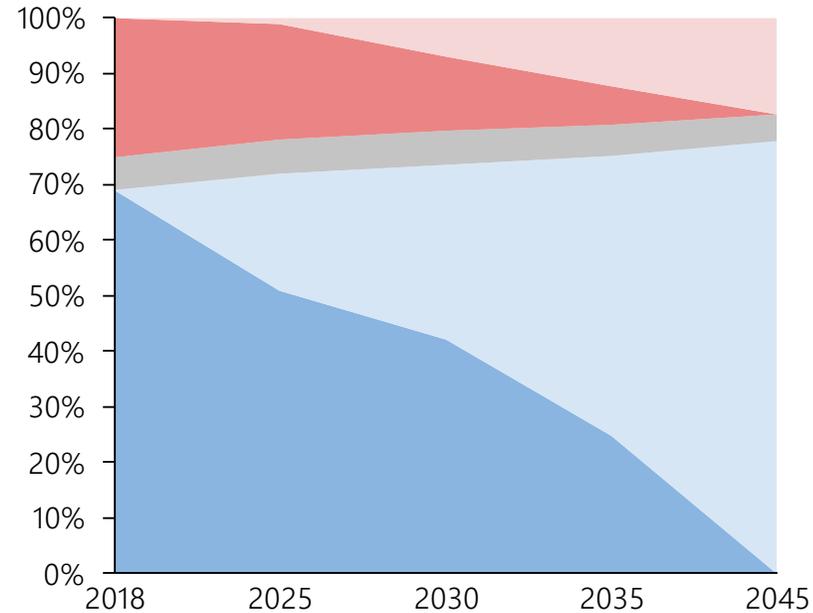


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario spielt der elektrische Steamcracker keine Rolle.
- Naphta und Erdgas werden vollständig durch Methanol ersetzt
- Höherer Verbrauch von MtO und MtA führen zu einem deutlichen Anstieg des Methanolbedarfs gegenüber dem Elektrifizierungsszenario.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Prozessaufteilung des Endenergieverbrauchs der Verarbeitung von Steinen und Erden

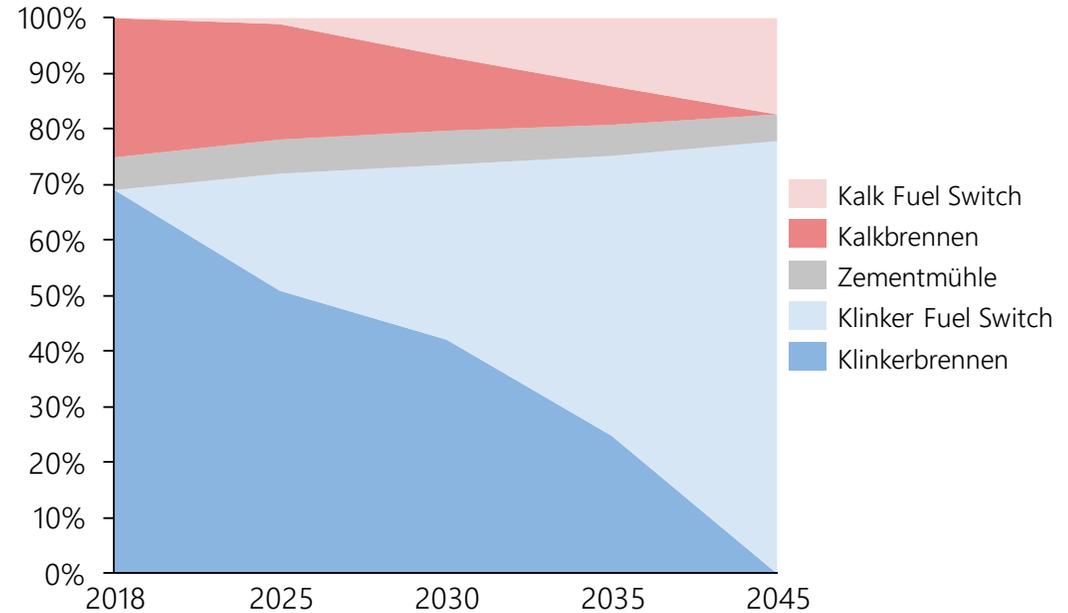
Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Ver.v. Steinen u. Erden
in % | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Im Jahr 2018 dominiert die Klinkerherstellung mit 69 %, gefolgt von Kalk 25 % und Zement 6 %, den Endenergieverbrauch.
- Die Zementmühle ist bereits vollständig elektrifiziert und wird daher nicht transformiert. Dennoch ist im Jahr 2045 ein leichter Rückgang durch die Effizienzsteigerung zu erkennen (5 %).
- Durch Produktionsmengenrückgang und Effizienzsteigerung sinkt der Anteil der Kalkherstellung bis 2045 auf 17 %.

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Ver. v. Steinen u. Erden
in % | Deutschland | Wasserstoffszenario

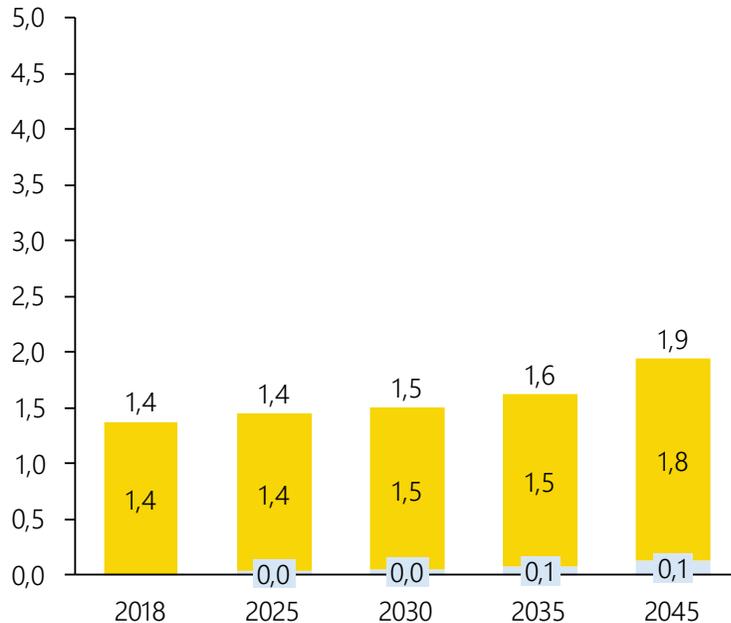


Kernaspekte

- Jeweils eine Transformationstechnologie führt bei beiden Szenarien zu gleichen Ergebnissen.
- Insgesamt zeigt sich bereits ab 2025 eine starke Transformation der Klinkerherstellung durch die entsprechenden Investitionszyklen.
- Es wird angenommen, dass der Fuel Switch durch Biomasse sehr einfach durchführbar ist.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Klinkerherstellung

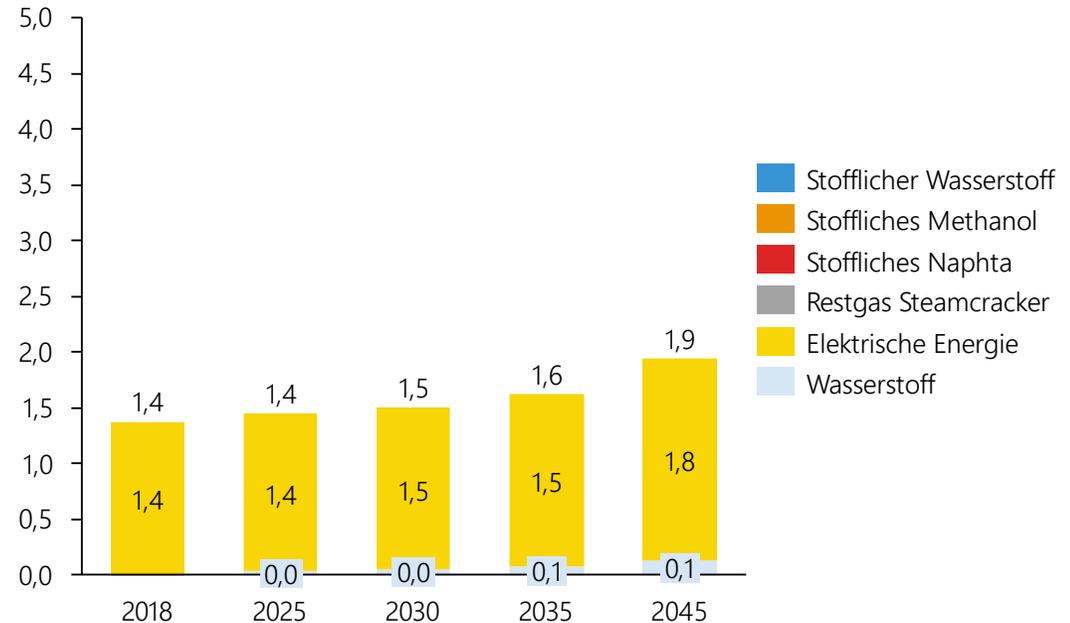
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Klinker
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Klinker-Produktion wird nicht elektrifiziert. Anstieg durch Produktionsmengenentwicklung und geringe Effizienzsteigerung.
- Wasserstoff-Einsatz durch Transformation der gasförmigen fossilen Brennstoffe.
- Den größten Anteil der konventionellen Energieträger machen feste und flüssige Brennstoffe aus.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Klinker
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

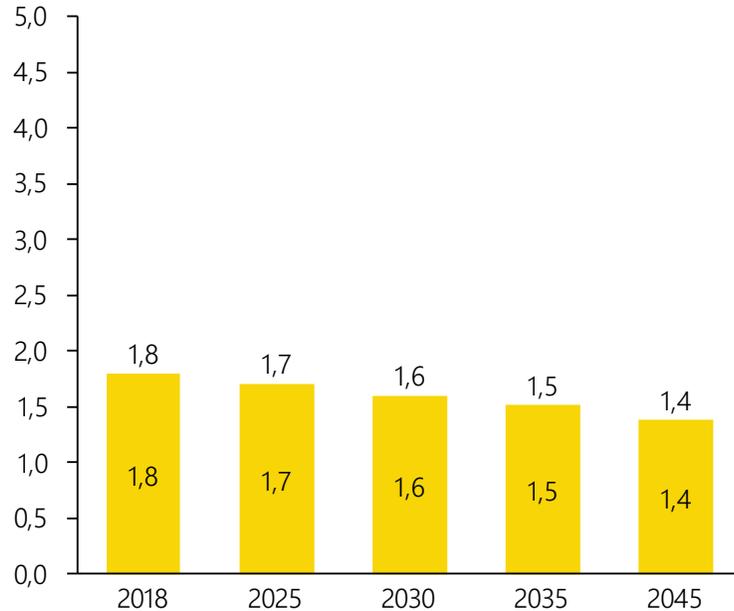


Kernaspekte

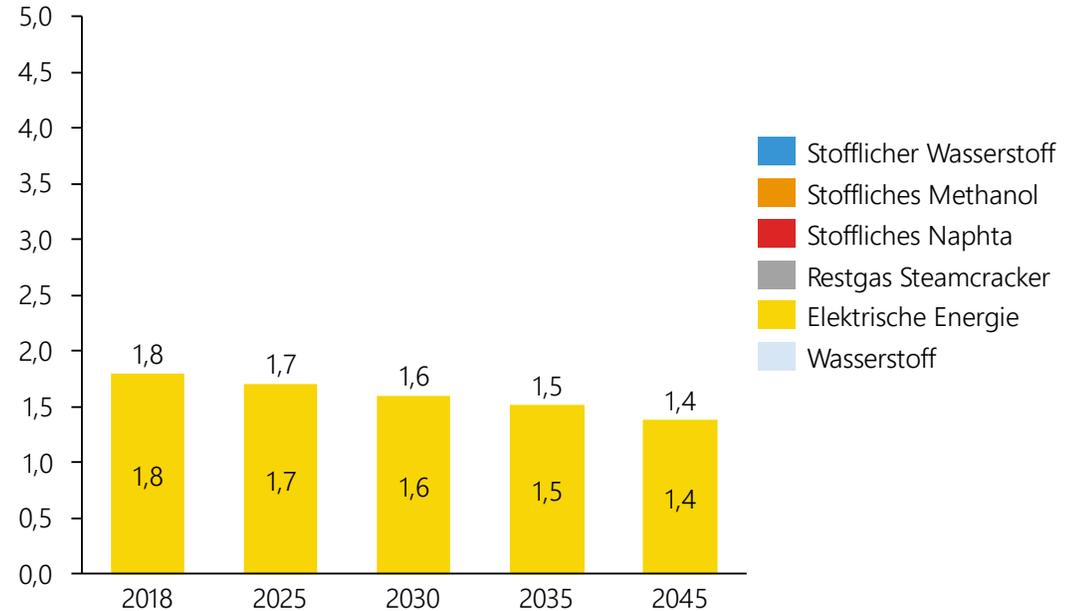
- Fuel Switch wird als einzige Transformationstechnologie bei der Klinkerherstellung angenommen.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Zementherstellung

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Zementmühle
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Strom-, H2- und Derivateverbrauch Zementmühle
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

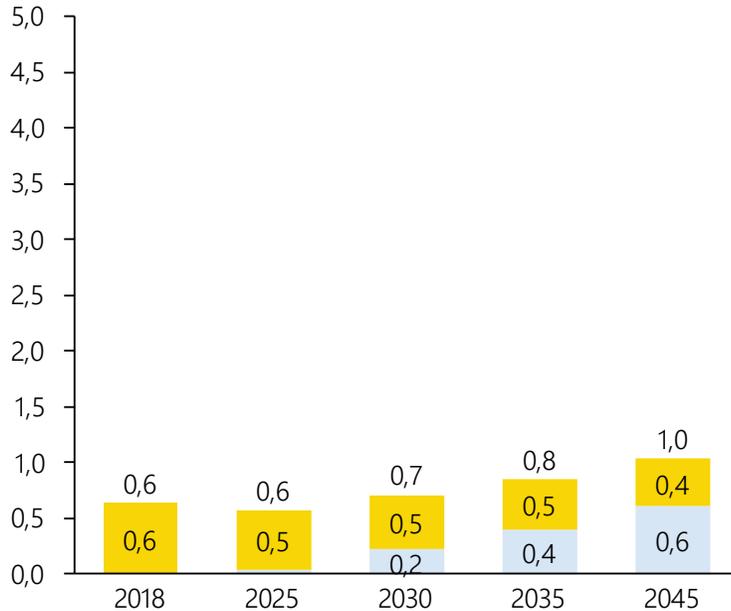


Kernaspekte

- Die Zementmühle wird nicht transformiert, da sie bereits strombasiert ist.
- Der Rückgang entsteht durch Effizienzsteigerungen.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Kalkherstellung

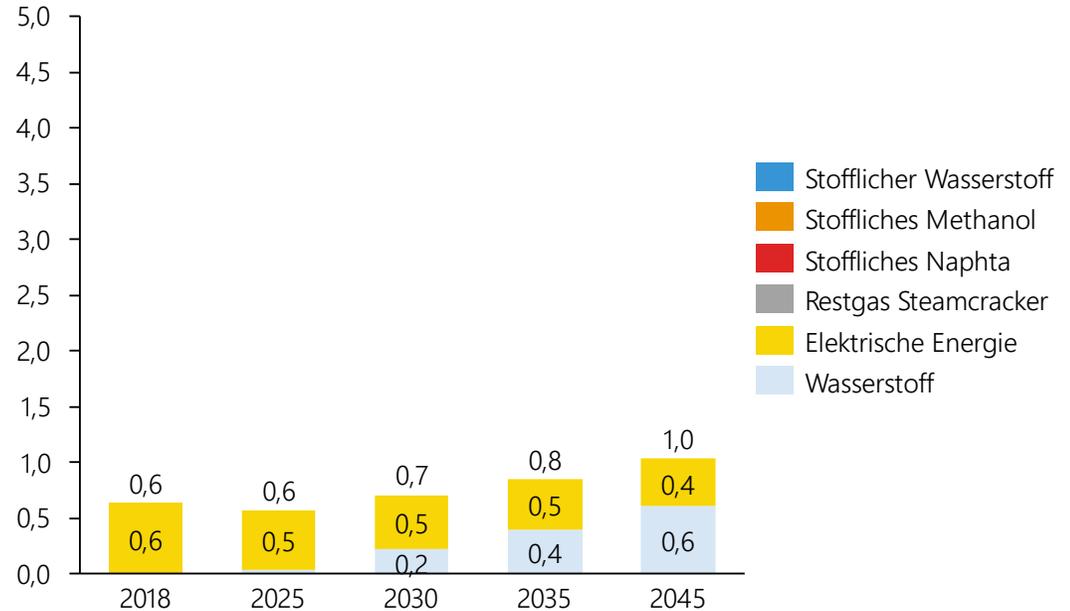
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Kalk
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Rückgang des Strombedarfs durch den Produktionsmengenrückgang der Kalkherstellung.
- Höherer Anteil an gasförmigen, fossilen Brennstoffen führt zu einem höheren Einsatz von Wasserstoff.
- Wie bei der Klinkerherstellung ist auch hier der Anteil der Biomasse deutlich höher als bei den hier betrachteten Energieträgern.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Kalk
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

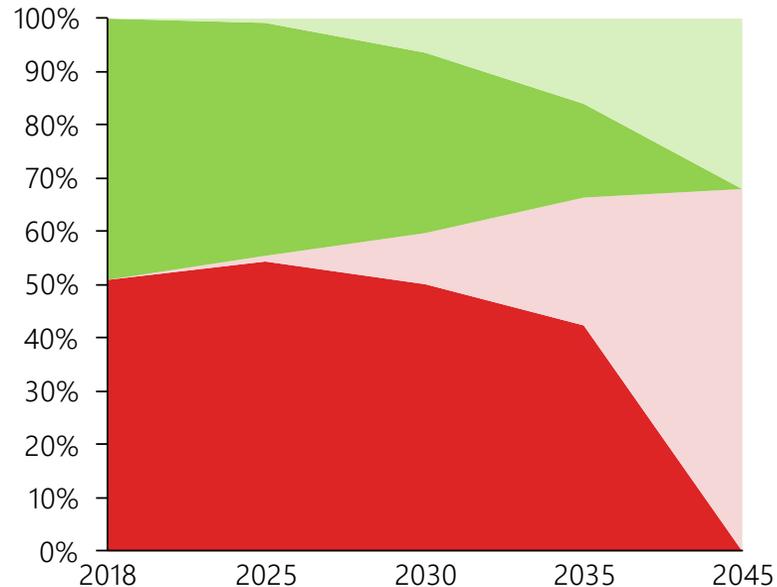


Kernaspekte

- Fuel Switch wird als einzige machbare Transformationstechnologie angenommen.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Prozessaufteilung des Endenergieverbrauchs des Glas und Keramik-Wirtschaftszweiges

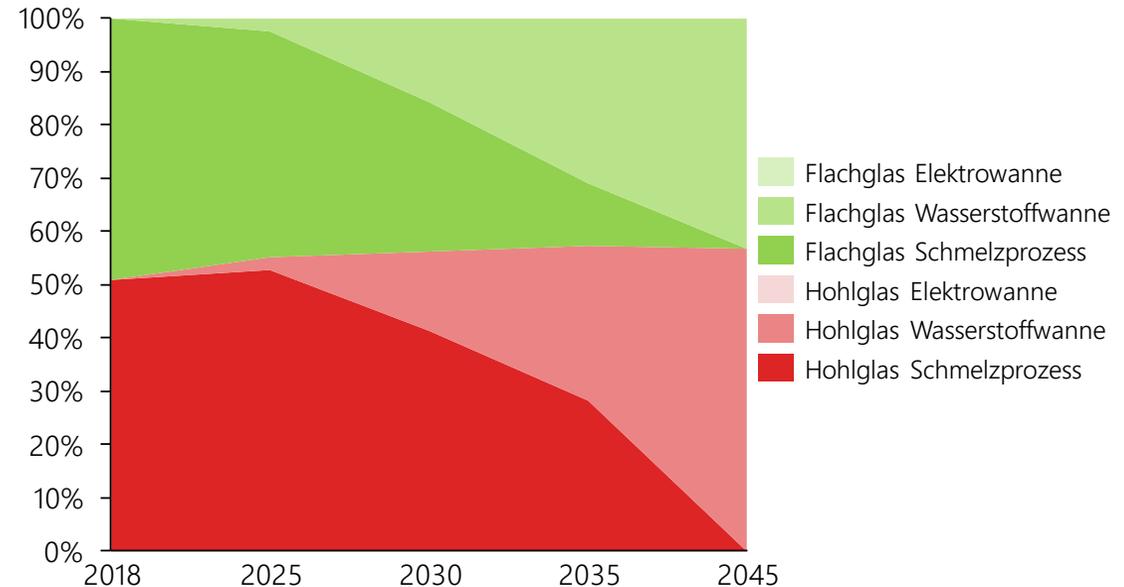
Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Glas & Keramik
in % | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Flach- und Hohlglas verbrauchen jeweils den selben Anteil an Endenergie.
- Durch die höhere Produktionsmenge von Hohlglas und die selben spez. elektrischen Verbräuche der beiden Transformationstechnologien (Flach- und Hohlglas) steigt der Anteil des transformierten Hohlglases im Jahr 2045 auf 68%.

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Glas & Keramik
in % | Deutschland | Wasserstoffszenario

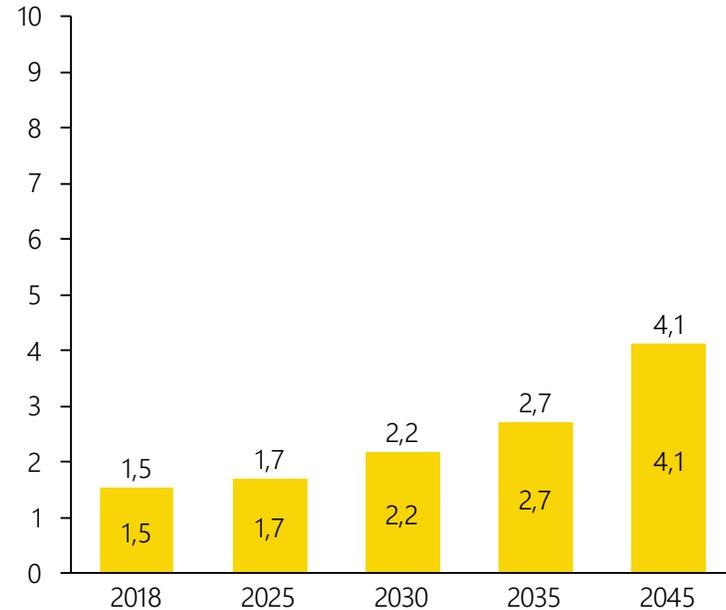


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario hat die Flachglas-Wasserstoffwanne einen höheren spez. Wasserstoffverbrauch, wodurch der Unterschied der Anteile zwischen Hohl- und Flachglas im Jahr 2045 nicht so deutlich ausfällt.
- Die beiden untersuchten Transformationstechnologien stellen Extremszenarien dar. In der Praxis wird sich sehr wahrscheinlich die Kombiwanne, welche mit Strom und Wasserstoff betrieben wird, durchsetzen.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Hohlglasproduktion

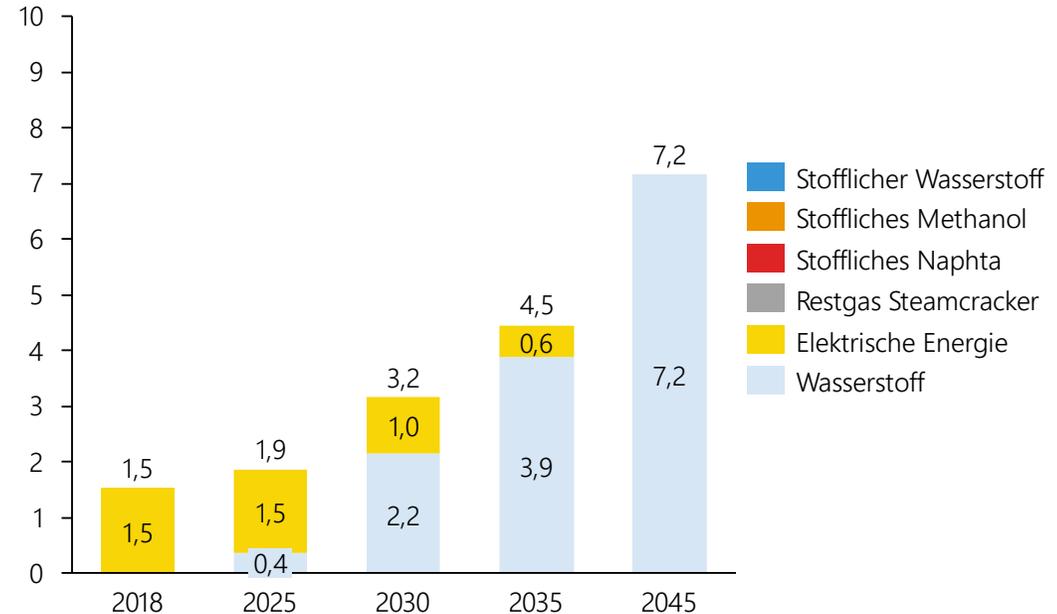
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Hohlglas
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Durch den hohen spez. Brennstoffverbrauch und die im Vergleich zum Flachglas höhere Produktionsmenge steigt durch die Transformation der Stromverbrauch deutlich an.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Hohlglas
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

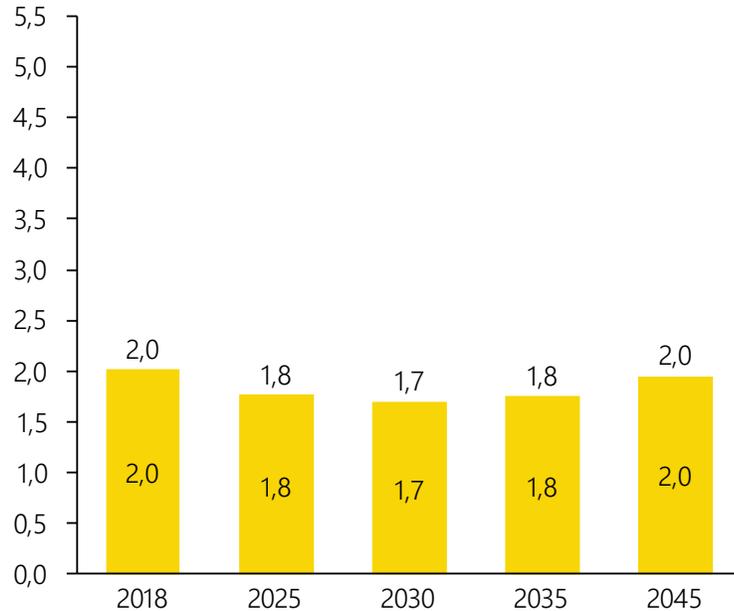


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario wird die konventionelle Schmelzwanne durch die Wasserstoffwanne, welche ausschließlich mit Wasserstoff betrieben wird, ersetzt.
- Durch den höheren spez. Verbrauch ist der Verbrauch der betrachteten Energieträger fast doppelt so hoch, wie im Elektrifizierungsszenario.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Flachglasherstellung

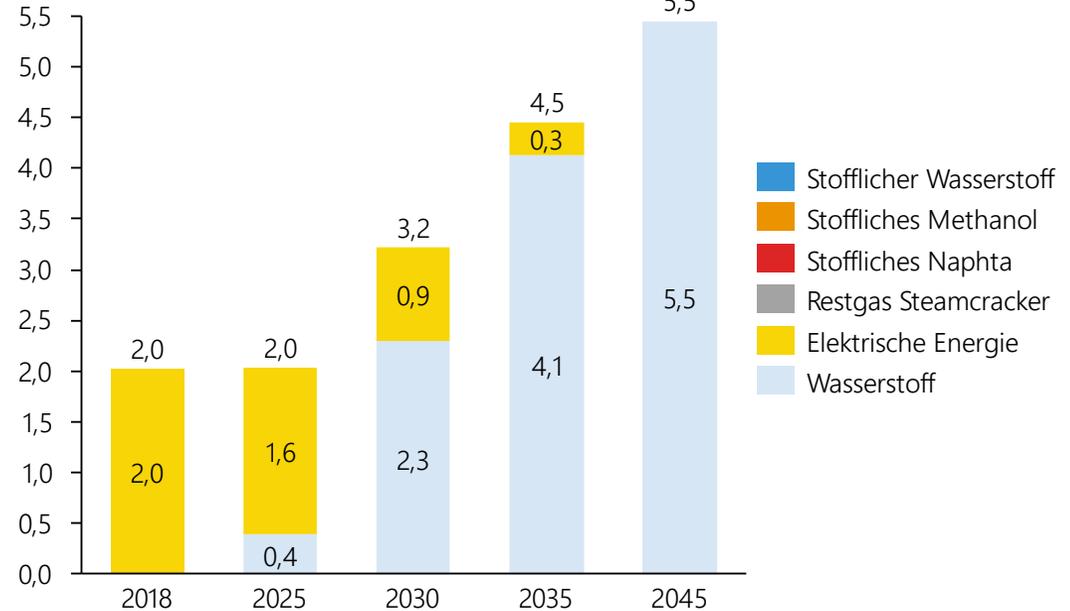
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Flachglas
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Im Vergleich zur Hohlglasherstellung gleichen sich die Effizienz- und Produktionsmengensteigerung bei der Transformation aus.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Flachglas
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

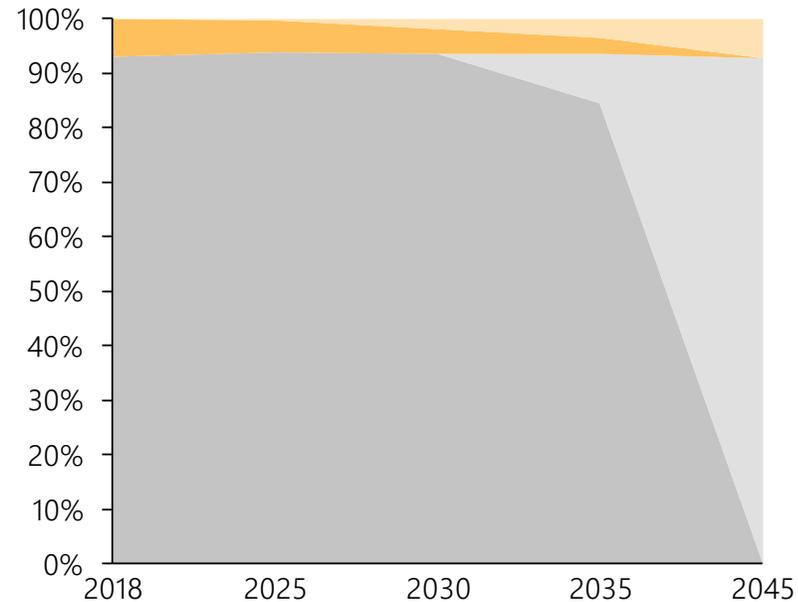


Kernaspekte

- Die Transformation durch die Wasserstoffwanne zeigt den im Vergleich zur Hohlglasproduktion höheren spez. Verbrauch. Der Wasserstoffbedarf ist fast dreimal so hoch wie der Strombedarf im Elektrifizierungsszenario.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffscenario – Prozessaufteilung des Endenergieverbrauchs der NE-Metalle

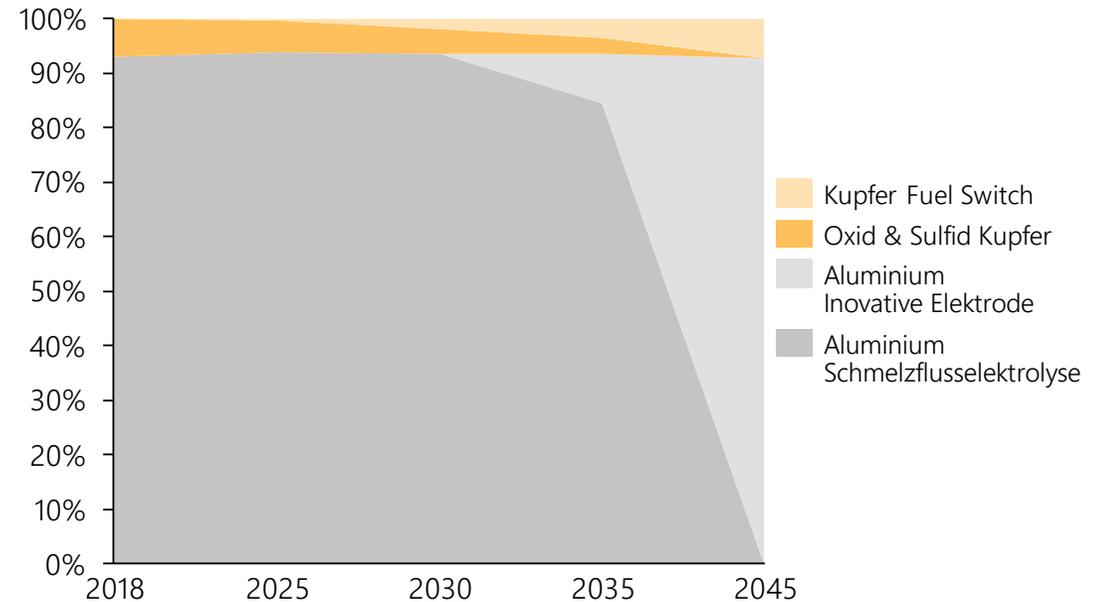
Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs NE-Metalle
in % | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Die Transformation wird durch die sehr langen Investitionszyklen im Vergleich zu allen betrachteten Prozessen deutlich später möglich sein.
- Dies stellt aufgrund relativ kurzer Investitionszyklen bei Alu (8 Jahre) aber kein Problem dar.
- Die Aufteilung zeigt, dass die Aluminiumherstellung deutlich energieintensiver als die Kupferherstellung ist.

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs NE-Metalle
in % | Deutschland | Wasserstoffscenario

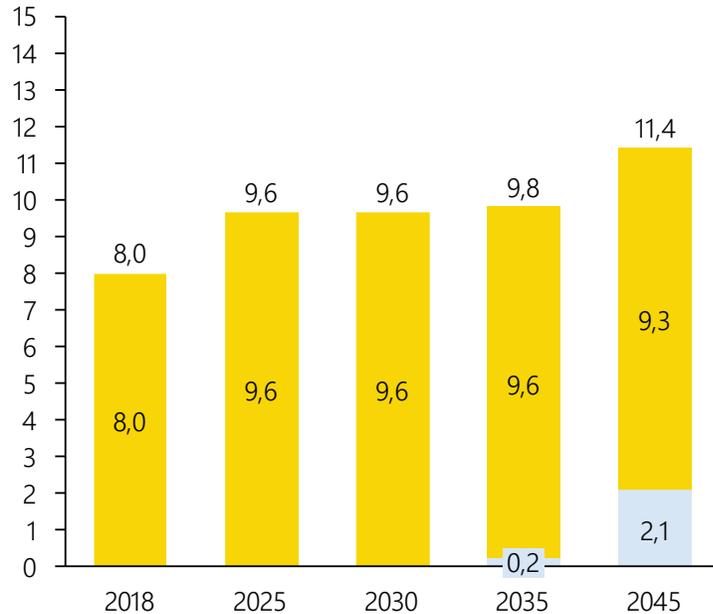


Kernaspekte

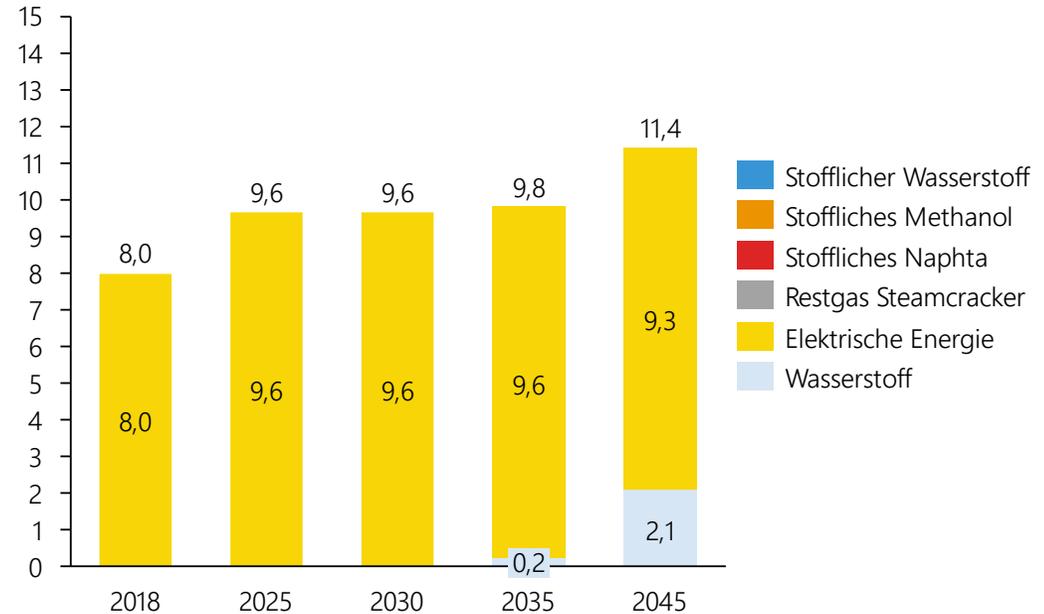
- Die innovativen Elektroden und der Fuel Switch bei der Kupferherstellung werden als einzige Technologien, die zum jetzigen Zeitpunkt für die Transformation in Frage kommen, angenommen.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Aluminiumherstellung

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Aluminium
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Strom-, H2- und Derivateverbrauch Aluminium
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

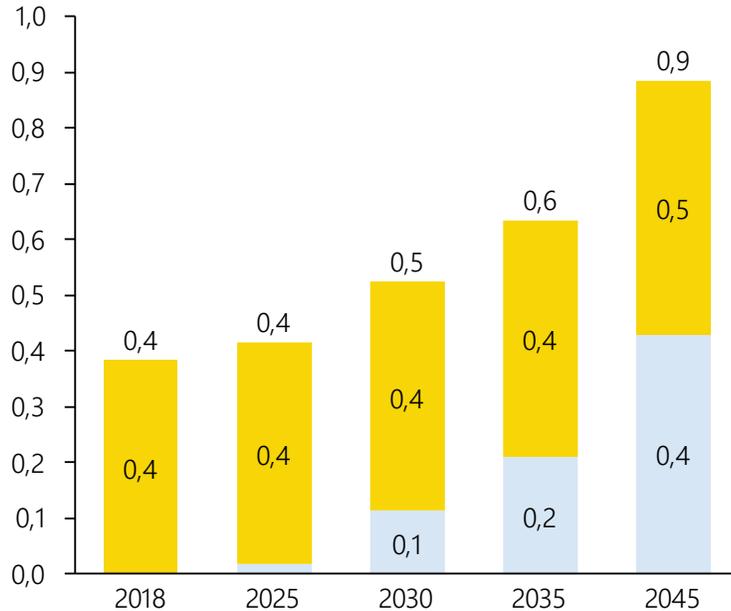


Kernaspekte

- Durch den Einsatz innovativer Elektroden wird ein Strommehrbedarf verursacht.
- Fossile Energieträger, die eingesetzt werden, werden durch Biomasse und Wasserstoff ersetzt.
- Andere Technologieoptionen, die auch die Prozessemissionen bei Alu reduzieren stehen, bis dato nicht zur Verfügung.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Kupferherstellung

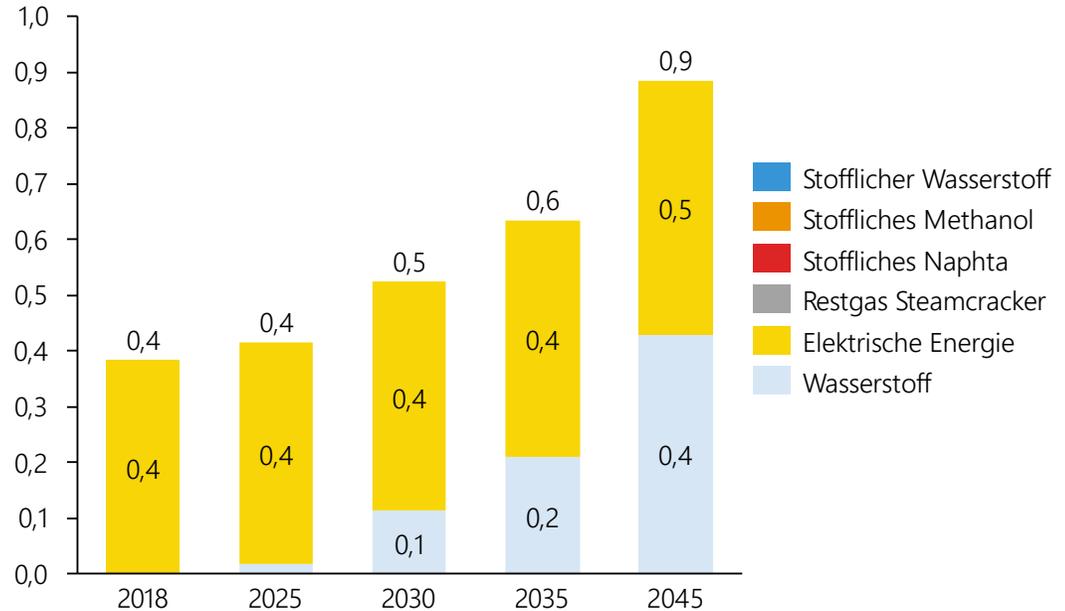
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Kupfer
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Durch den Fuel Switch werden bei der Transformation der Kupferherstellung die gasförmigen Brennstoffe durch Wasserstoff ersetzt.
- Im Gegensatz zur Aluminiumherstellung kann die Transformation aufgrund des Investitionszyklus bereits ab 2025 beginnen.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Kupfer
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

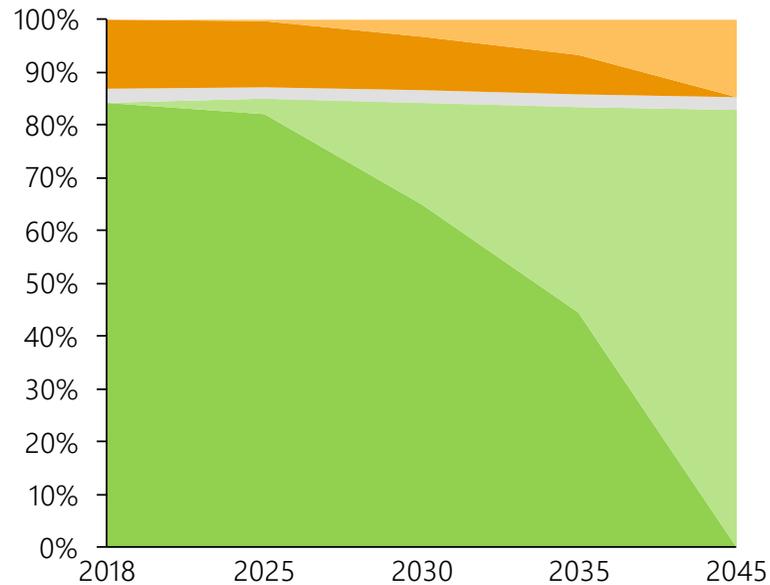


Kernaspekte

- Wie bei der Aluminiumherstellung wird der Fuel Switch aufgrund des sehr hohen Temperaturniveaus der Prozesswärme als einzige Transformationstechnologie angenommen.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Prozessaufteilung des Endenergieverbrauchs des Papiergewerbes

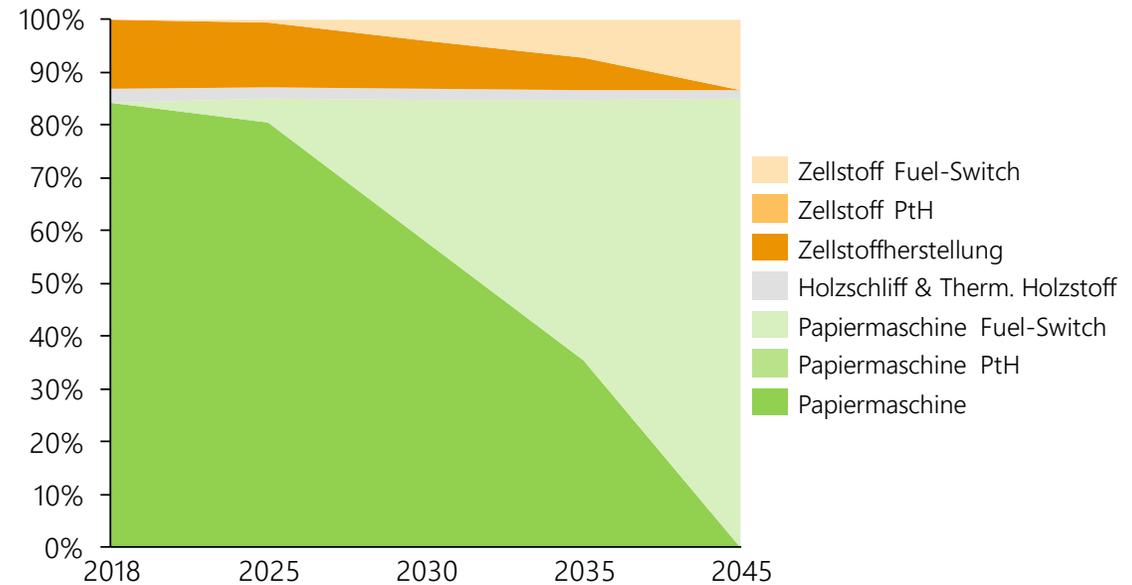
Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Papiergewerbe
in % | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Im Elektrifizierungsszenario prägt der Einsatz von PtH zur Trocknung der Papierbahnen das Bild der Transformation.

Prozessverteilung des Endenergieverbrauchs Papiergewerbe
in % | Deutschland | Wasserstoffszenario

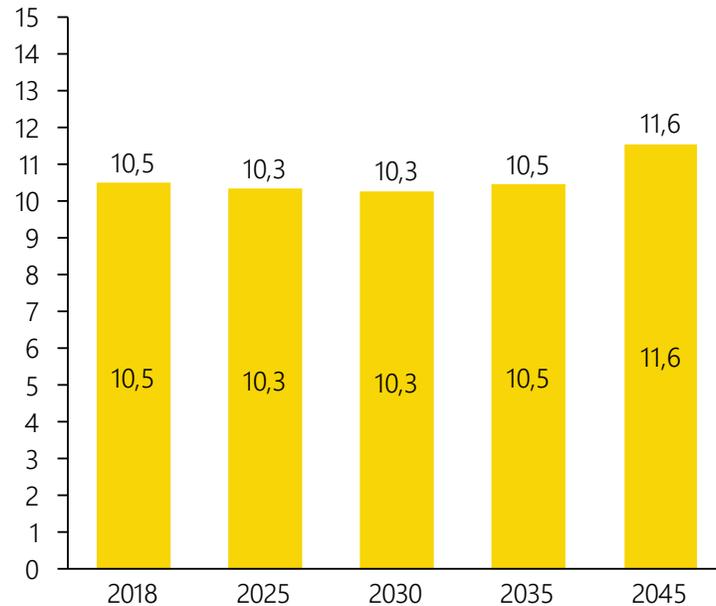


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario kommt es statt zu einer Elektrifizierung der NT-Prozesswärme zum Einsatz von Wasserstoff in den KWK-Anlagen und Kesseln der Papierindustrie.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Papierherstellung

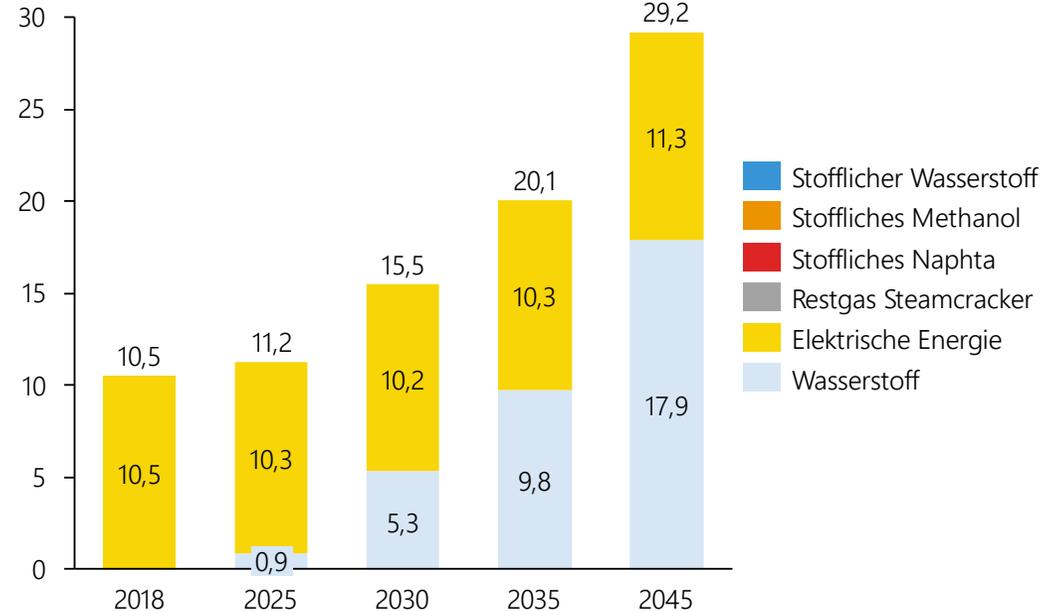
Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Papiermaschine
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Im Elektrifizierungsszenario werden die fossilen Brennstoffe der Papierherstellung durch Power-to-Heat-Technologien transformiert. Durch die hohe Effizienzsteigerung bleibt der elektrische Energieverbrauch trotz leicht steigender Produktionsmenge nahezu gleich.

Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Papiermaschine
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

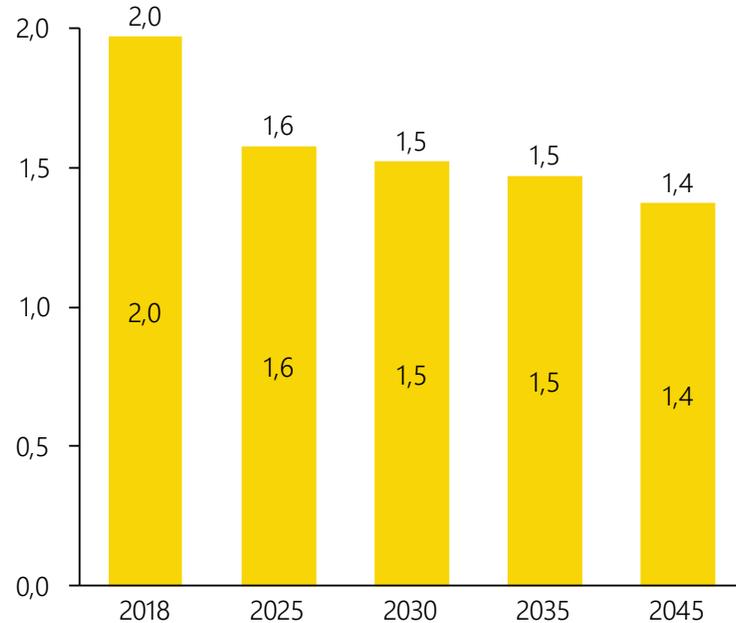


Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario werden die gasförmigen Brennstoffe durch Wasserstoff ersetzt. Durch den hohen Erdgaseinsatz im konventionellen Prozess steigt folglich der Wasserstoff durch die Transformation deutlich an.
- Im Gegensatz zur Elektrifizierung bleibt beim Fuel Switch der spez. Stromverbrauch im Vergleich zum konv. Prozess gleich und der Stromverbrauch steigt durch den Anstieg der Produktionsmenge.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Holzstoffproduktion

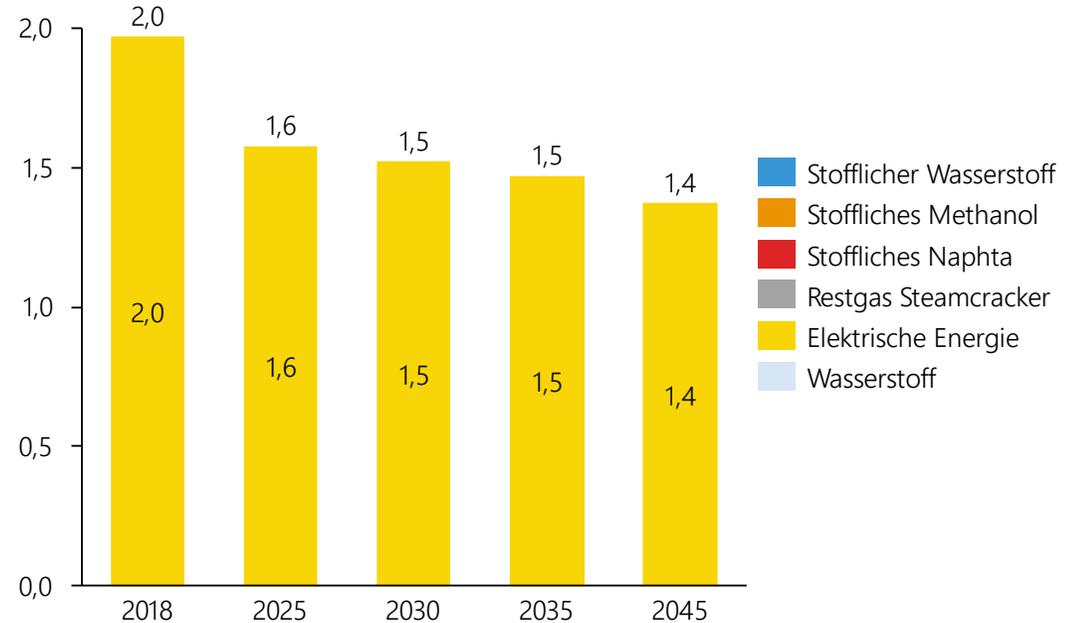
Strom-, H2- und Derivateverbrauch Holzstoff
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario



Kernaspekte

- Die Holzstoffproduktion wird trotz des Einsatzes von fossilen Brennstoffen nicht transformiert, da durch Energierückgewinnung und effizienten Umgang mit Abfallprodukten die Gesamtbilanz der fossilen Energieträger negativ ausfällt. Lediglich der Stromverbrauch bleibt als positiver Beitrag bestehen.

Strom-, H2- und Derivateverbrauch Holzstoff
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario

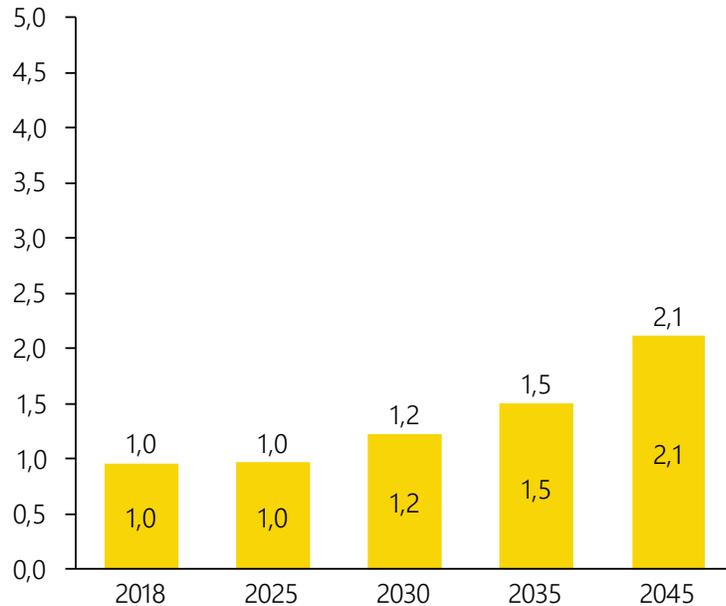


Kernaspekte

- In der Holzstoffproduktion entsteht durch die Corona-Krise ein Rückgang der Produktion bis 2025. Dieser stagniert in den folgenden Jahren. Durch Effizienzsteigerungen geht der Energiebedarf ab 2025 zurück.

Elektrifizierungs- & Wasserstoffszenario – Strom-, Wasserstoff- und Derivateverbrauch der Zellstoffproduktion

Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Zellstoff
in TWh | Deutschland | Elektrifizierungsszenario

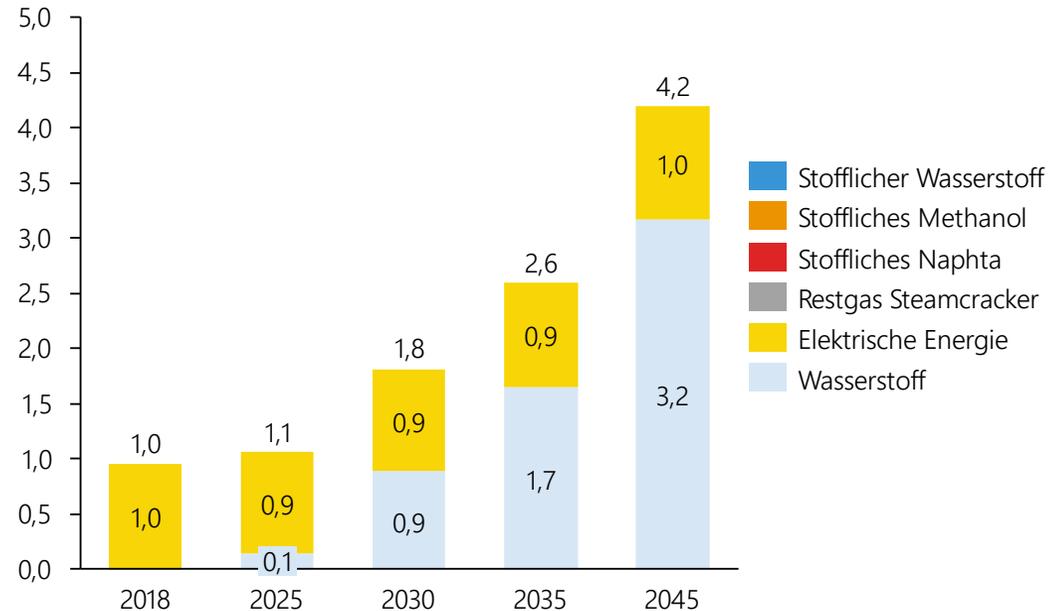


Kernaspekte

- Die Zellstoffproduktion hat gegenüber der Papiermaschine einen höheren spez. Brennstoffverbrauch. Dieser wird infolge der Elektrifizierung durch elektrische Energie ersetzt, wodurch der Verbrauch ab 2030 deutlicher steigt.
- Vor 2030 werden nur geringe Produktionskapazitäten transformiert und Produktionsmengen- und Effizienzsteigerung gleichen sich aus.

Abschlussbericht

Strom-, H₂- und Derivateverbrauch Zellstoff
in TWh | Deutschland | Wasserstoffszenario



Kernaspekte

- Im Wasserstoffszenario werden wie bei der Papiermaschine die gasförmigen und festen Brennstoff durch Wasserstoff und Biomasse ersetzt.
- Auch hier ist der hohe Einsatz von Erdgas, welcher durch Wasserstoff ersetzt wird, zu erkennen.

Fazit Industrieszenarien

Elektrifizierungsszenario

- Wo technisch sinnvoll/möglich, wird auf die Direktstromnutzung gesetzt. Dies ist aus Gründen der Systemeffizienz sinnvoll.
- Im Vergleich zu anderen extremen Elektrifizierungsszenarien wird dabei jedoch v.a. im HT-Prozesswärme-Bereich jedoch **nicht** pauschal alles elektrifiziert → Es kommt auch hier zu energetischer Wasserstoffnachfrage.
- Bei einigen der betrachteten Prozesse (z.B. Ammoniak, Methanol, HVC) ist die direkte Elektrifizierung keine oder erst sehr spät eine Option. In diesen Bereichen entsteht eine robuste H₂-Nachfrage.
- Synthetische Brennstoffe werden im Szenario nicht eingesetzt. Wasserstoff, Strom und Biomasse sind die Energieträger der Zukunft in der Industrie.

Wasserstoffszenario

- Unter der Annahme, dass H₂ sehr günstig und in großen Mengen auch in der Fläche verfügbar ist, setzen sich H₂-Verfahrensrouten und Wasserstoffbrenner auch in Bereichen durch, in denen die Direktstromnutzung möglich ist.
- Der Methanolverbrauch spielt in diesem Szenario eine große Rolle, er kann zu einem signifikanten Treiber der Strom- und Wasserstoffverbräuche werden.

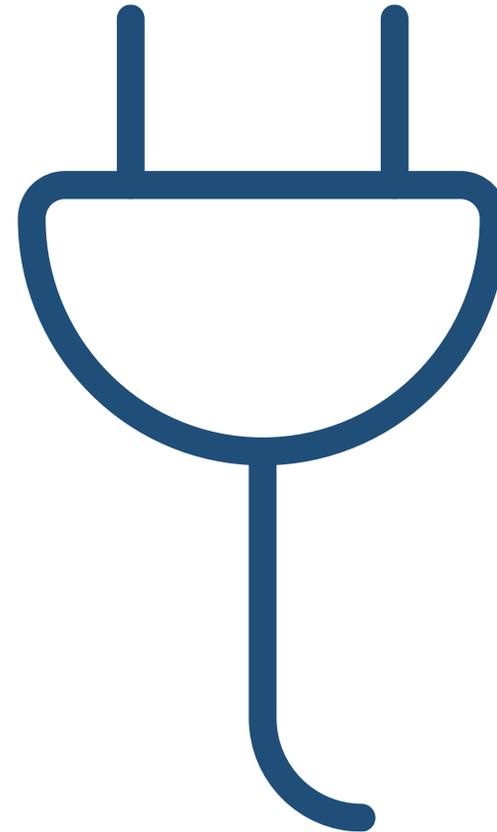
Limitationen des Transformationstools und der Szenarien in der Kurzstudie

Trotz der Detailbetrachtung einzelner Prozesse mussten im Rahmen der Kurzstudie Vereinfachungen getroffen werden, die die Aussagekraft der Ergebnisse zum Teil einschränken. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die umfängliche und ausdifferenzierte Berechnung von Industrieszenarien zum Teil mehrere Monate dauern kann. Eine solche Betrachtungstiefe konnte in dieser Kurzstudie natürlich nicht erreicht werden. Folgende Aspekte könnten in höherer Breite und Tiefe betrachtet werden:

- Anzahl der betrachteten Prozesse
- Anzahl der betrachteten Industriemaßnahmen
- Wechselwirkungen zwischen Prozessen
- Der Fokus im Projekt waren H_2 , -derivate und Stromverbräuche: Durch eine vollständige Auswertung des EEV nach Prozess kann ein ganzheitlicheres Bild auf die Transformation geworfen werden.
- Pauschale Verminderungsmaßnahmen: Wenngleich ein gängiges Mittel in der Industriemodellierung, stellen pauschale THG-Verminderungsmaßnahmen natürlich eine grobe Vereinfachung der Realität dar.

4. Lastprofile und maximale Anschlussleistung

Methodik und
Visualisierung der
Lastprofile



Zeitlicher Verlauf des Stromverbrauchs je Wirtschaftszweig



Neben den **jährlichen Strommengen** aus der **Status quo-Analyse** und den **Transformationspfaden** ist auch der zeitliche Verlauf relevant, um die **maximale Anschlussleistung** je Landkreis ableiten zu können (siehe Kapitel 6). Hierzu werden **normierte Lastprofile je Wirtschaftszweig*** berechnet.

Da der Fokus auf der Ermittlung der maximalen Anschlussleistung liegt, werden keine Jahreslastprofile erstellt, sondern **Lastzeitreihen für eine Typwoche** in stündlicher Auflösung**. Die normierten Lastprofile für eine Typwoche stellen allein den Stromverbrauch für die Produktion dar und sind jahresunabhängig.

Der Stromverbrauch der Raumwärme bei einer Elektrifizierung wird über ein separates Wärmepumpenprofil (nicht jahresunabhängig, Wetterjahr 2012) abgebildet. Anhand des Maximalwerts der Typwoche und dem zugehörigem Stromverbrauch für die Raumwärme wird die maximale Anschlussleistung bestimmt.

Im Folgenden werden die Methodik zur Erstellung der normierten Lastprofile erläutert und die Lastprofile je Wirtschaftszweig dargestellt. Im Anschluss daran wird die Methodik zur Ermittlung der maximalen Anschlussleistung dargelegt.

* Aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeit werden einige WZ-Lastprofile zusammengefasst.

** Abweichend vom ursprünglichem Angebot, dies wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt.

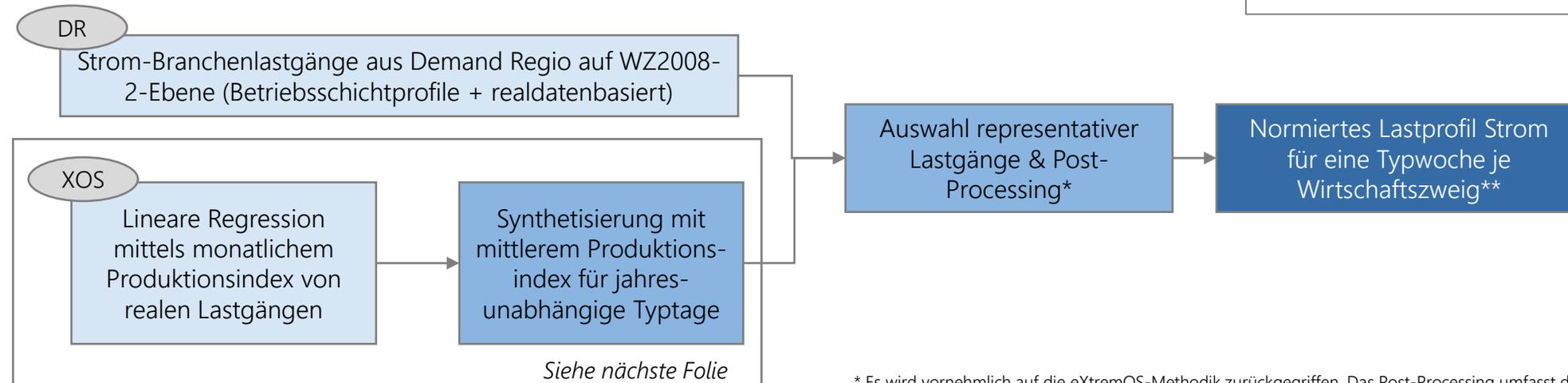
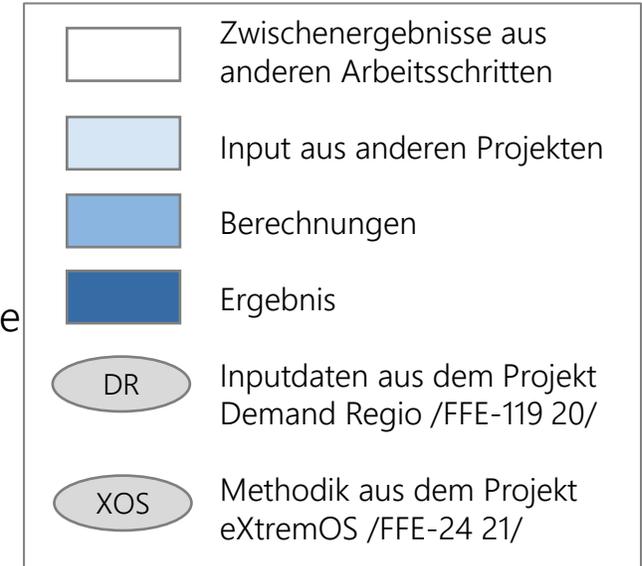
Methodik: Erstellung normierter Lastprofile

Ziel: Stündlicher Verlauf für die Nutzung in zukünftigen Berechnungen für den Auftraggeber und Datengrundlage für die Berechnung der max. Anschlussleistung

Mögliche Daten: Stündliche Jahreszeitreihen für ein fest definiertes Jahr (z.B. 2018)

Problem: Jahreslastgang für ein fest definiertes Jahr unglücklich. Grund: vorgegebene Feiertage, Verteilung der Wochentage, mögliche unübliche Variationen des Produktionsindex

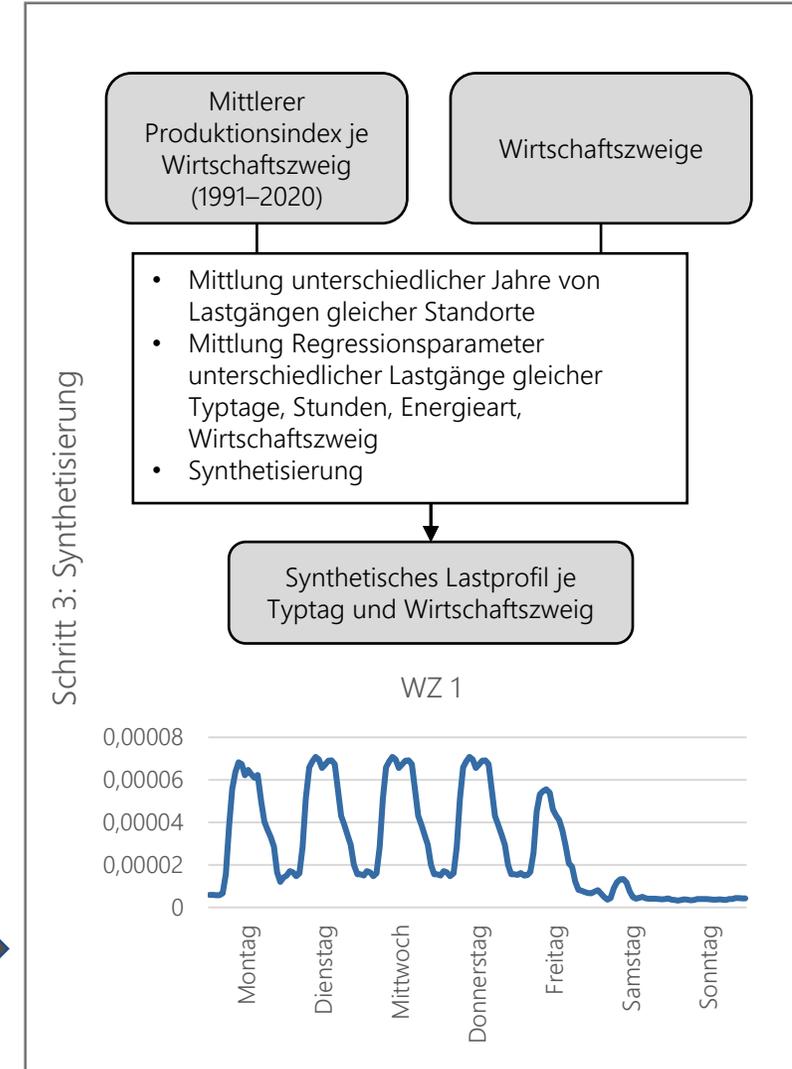
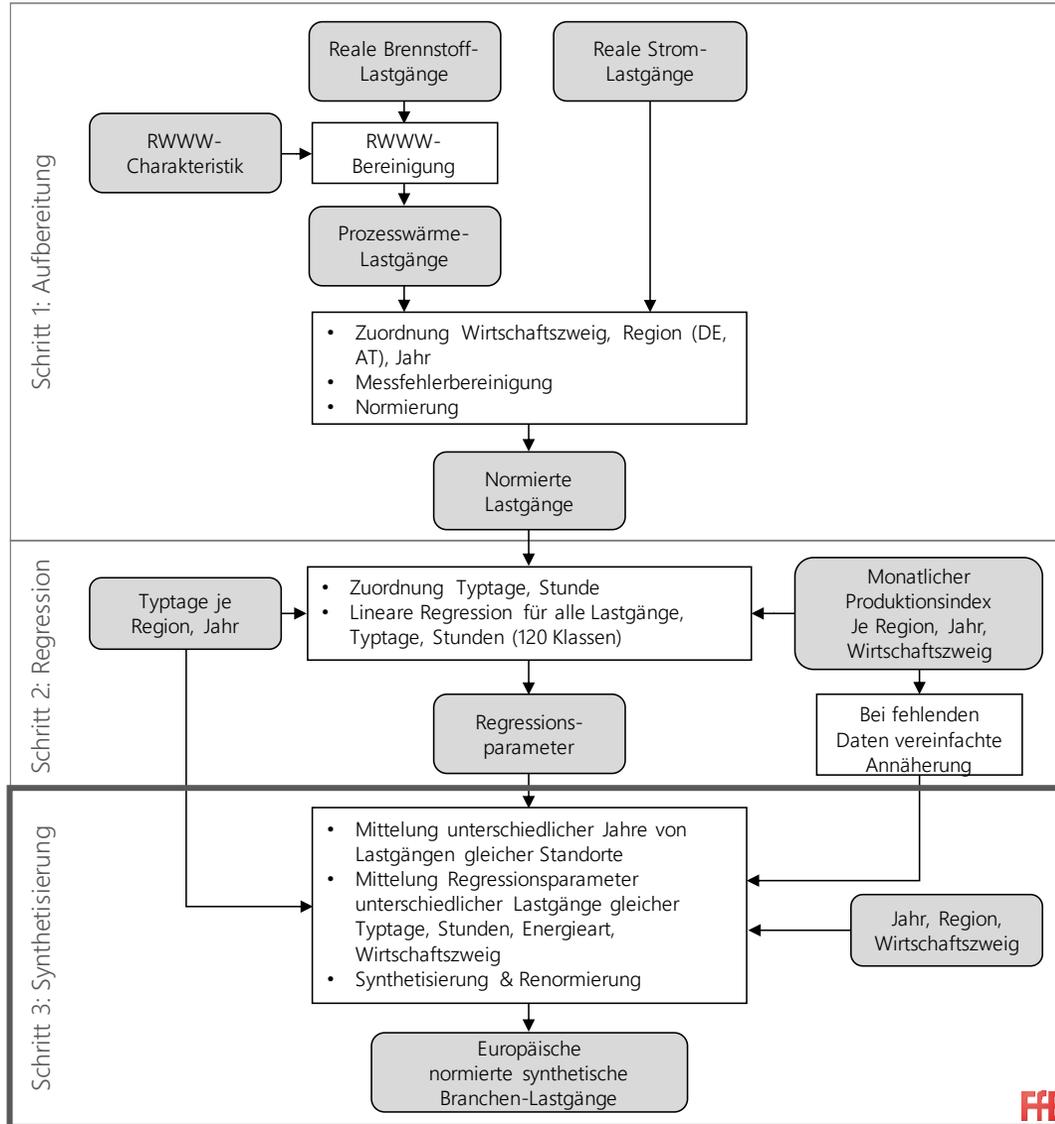
Lösung: stündliche, jahrunabhängige Typtageszeitreihen je Wirtschaftszweig



* Es wird vornehmlich auf die eXtremOS-Methodik zurückgegriffen. Das Post-Processing umfasst das Ausbessern von Artefakten, welche aus der Regression und Synthetisierung entstehen. Hierbei wird möglichst wenig nachträglich angepasst um die Methodik der Regression als Realdaten nicht zu verwässern.

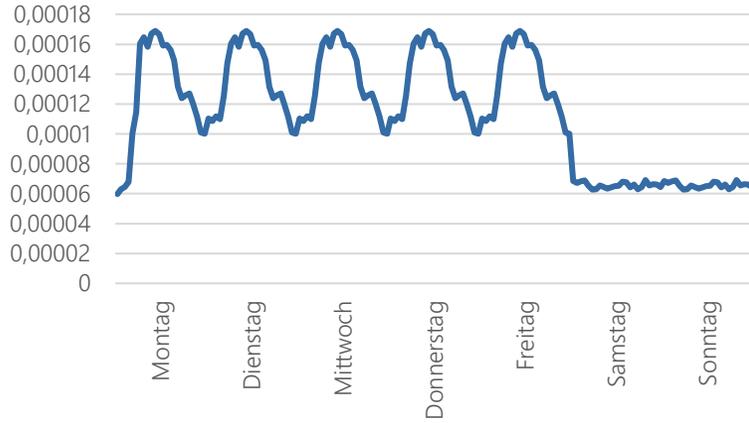
** Die Lastprofile für eine Typwoche sind auf 1/52 normiert, damit die Wochenprofile nachgelagert auf ein Jahr aneinandergereiht werden können.

Anpassung der Methodik aus eXtremOS

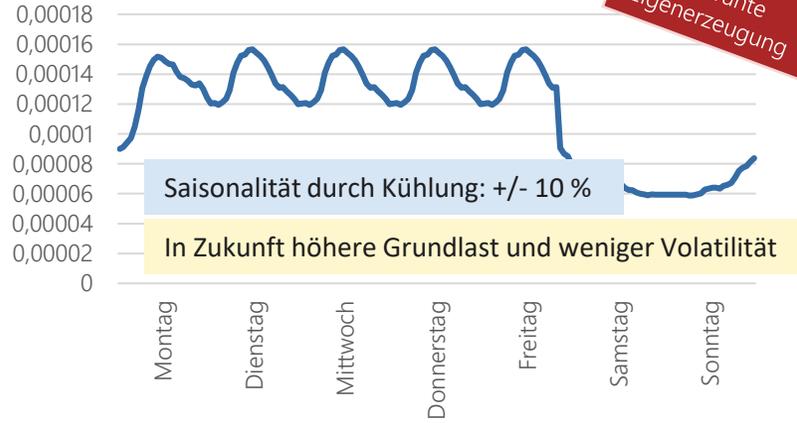


Normierte Lastprofile (basierend auf eXtremOS)

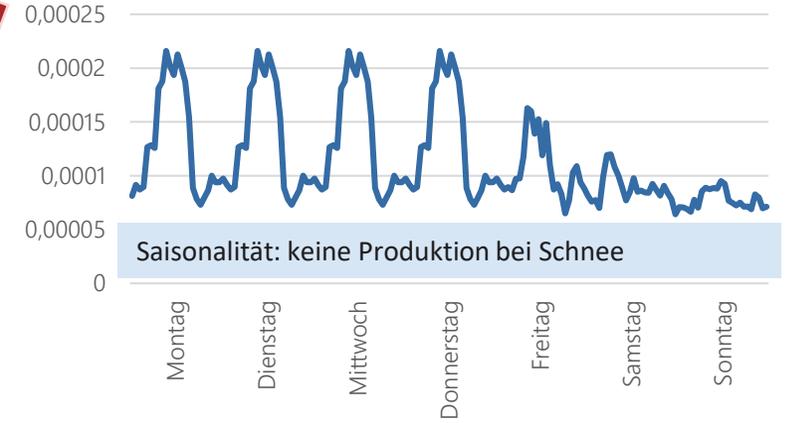
Gummi- u. Kunststoffwaren



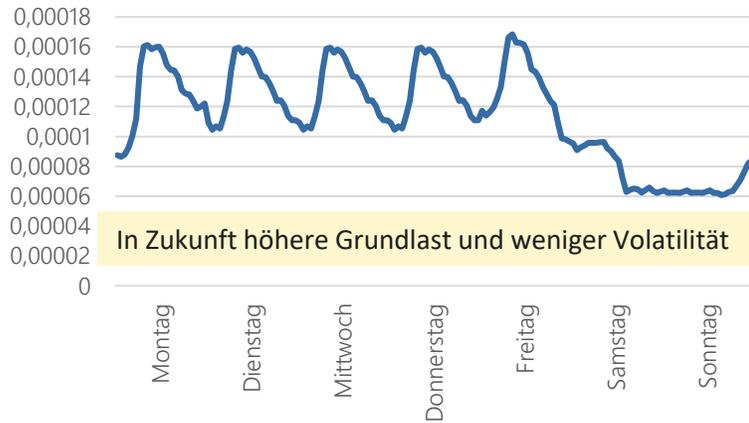
Ernährung und Tabak



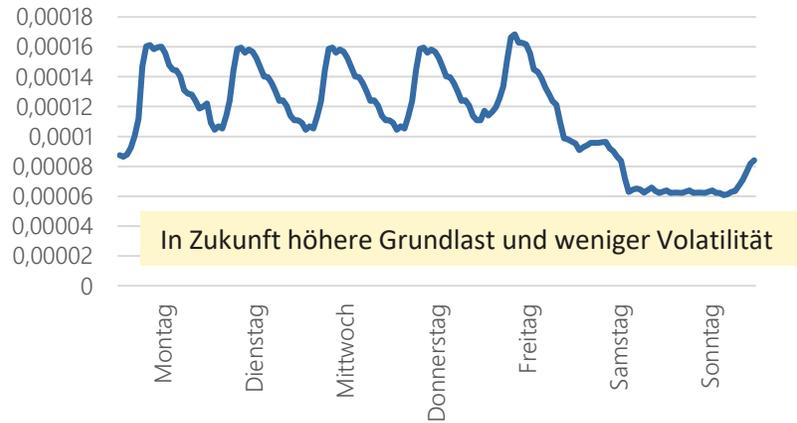
Verarbeitung v. Steinen u. Erden



Maschinenbau



Fahrzeugbau

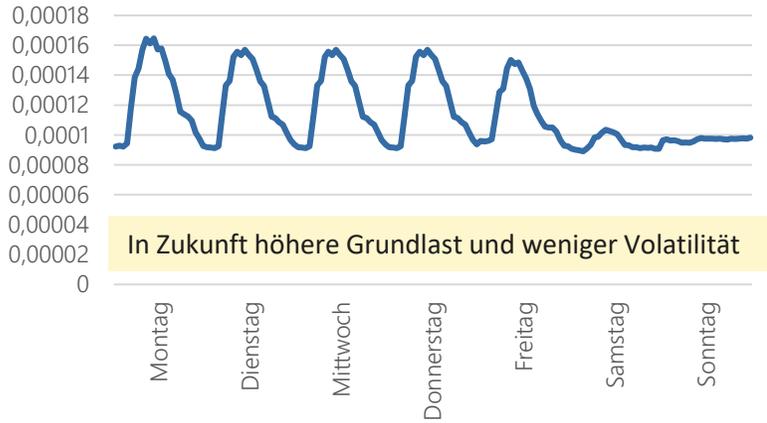


Legende zu dem Kommentarblöcken

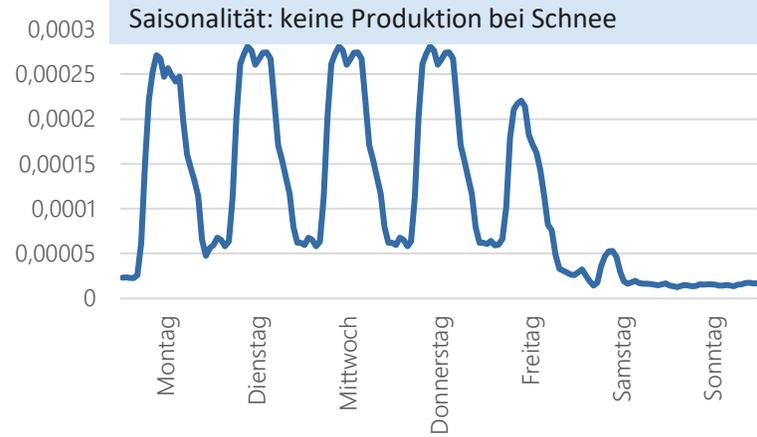
- saisonale Effekte
- zu erwartende Entwicklungen für die Zukunft aufgrund der Transformationspfade
- relevante Eigenerzeugung

Normierte Lastprofile (basierend auf eXtremOS)

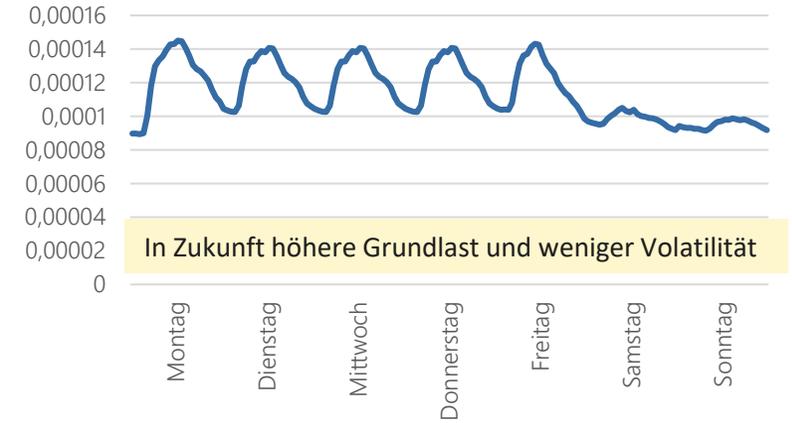
sonst. Chemie



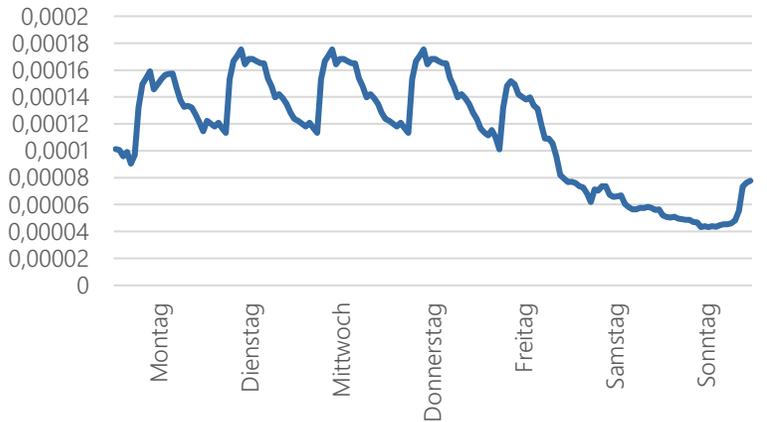
Gewinnung von Steinen und Erden



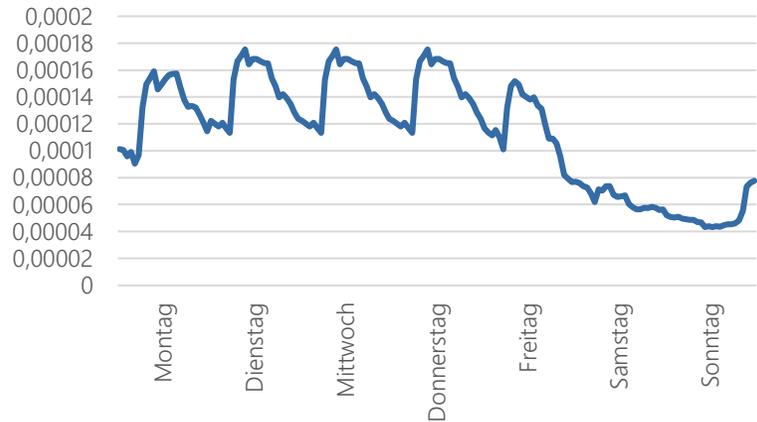
Metallerzeugung



Metallbearbeitung



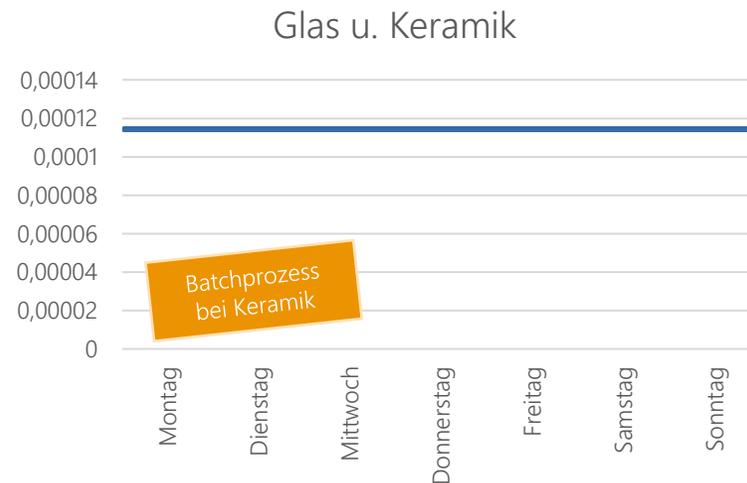
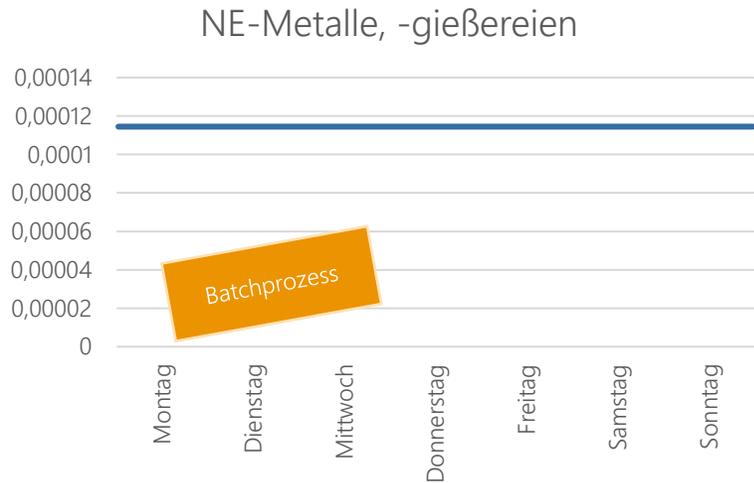
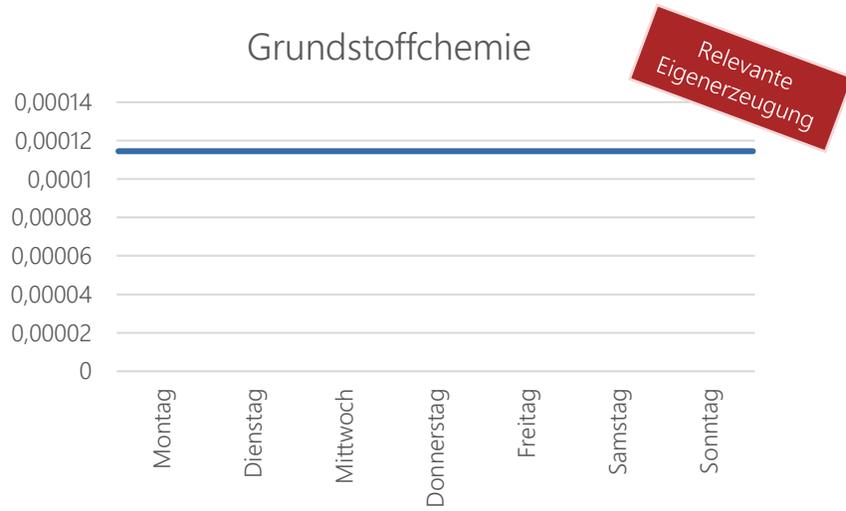
sonstige



Legende zu dem Kommentarblöcken

- saisonale Effekte
- zu erwartende Entwicklungen für die Zukunft aufgrund der Transformationspfade
- relevante Eigenerzeugung

Normierte Lastprofile – Demand Regio



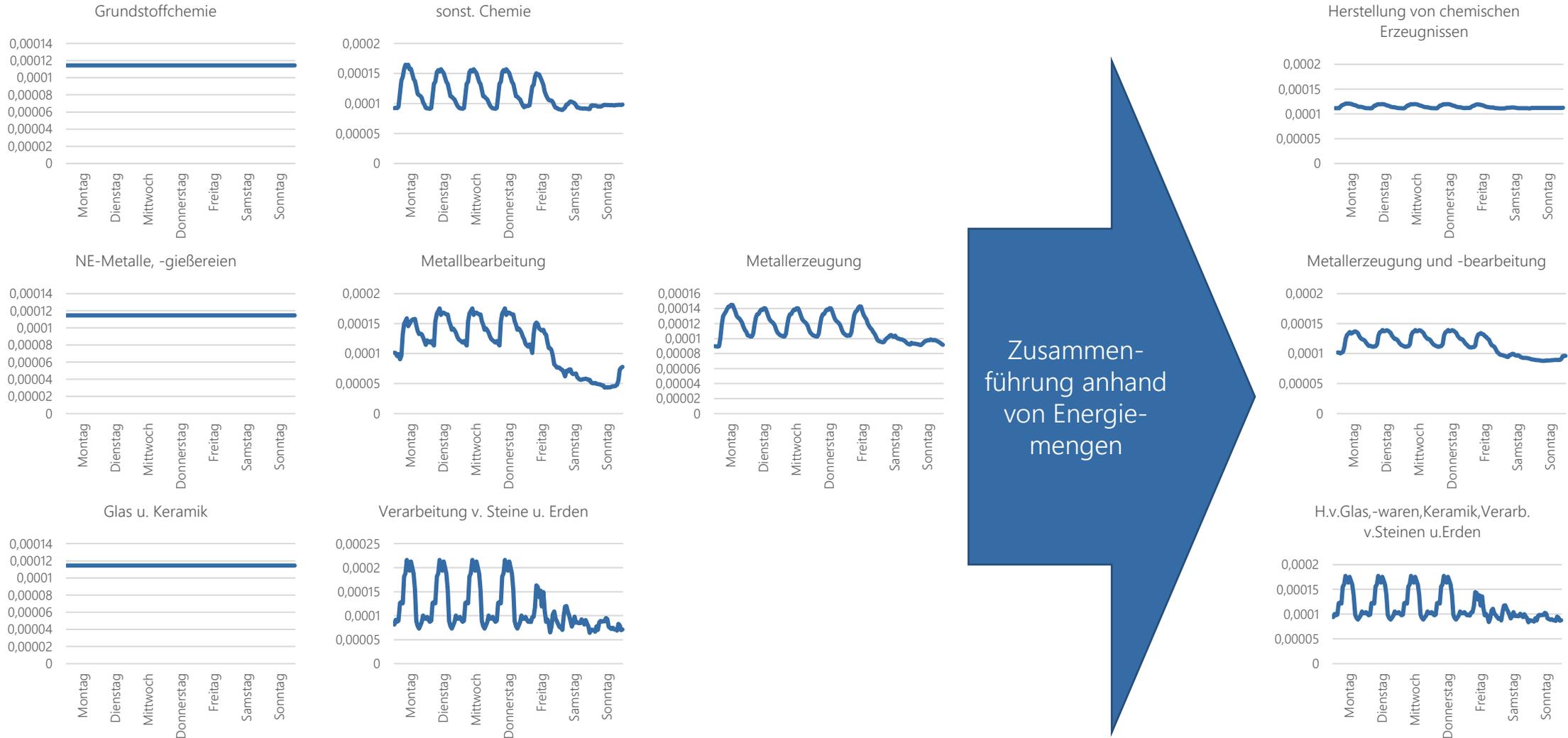
Legende zu dem Kommentarblöcken

- Vereinfachungen bei Batchprozessen
- relevante Eigenerzeugung

Bemerkung zu den normierten Lastprofilen

- Maschinenbau und Fahrzeugbau sowie Metallbearbeitung und „Sonstige“ wurden in der Regression zusammengefasst, sodass diese denselben Verlauf aufweisen.
- Allgemein liegen die Lastspitzen werktags (zumeist Dienstag bis Donnerstag) zwischen 10:00 und 13:00. In seltenen Fällen liegen sie montags oder freitags, wobei dies zumeist kleinere Artefakte sind, die jedoch zu vernachlässigen sind.
- Für die Wirtschaftszweige Grundstoffchemie, Papiergewerbe, NE-Metalle, -gießereien und Glas & Keramik werden Strichprofile verwendet, wie es auch schon im Projekt Demand Regio erfolgt ist. Im Fall der Grundstoffchemie und des Papiergewerbes entspricht dies auch dem zeitlichen Verlauf einzelner Standorte. Im Fall von NE-Metallen, -gießereien und Glas & Keramik ist dies eine Vereinfachung zur Darstellung von Batchprozessen. Hier wird davon ausgegangen, dass aufgrund sehr unterschiedlich verlaufender Batchprozesse je Standort das Branchen-Lastprofil sich vergleichmäßigt. Dies ist vor allem für kleine regionale Einheiten eine Vereinfachung, welche hier aufgrund fehlender besserer Alternativen gewählt wurde.
- Bei Ernährung & Tabak, Verarbeitung von Steinen und Erden sowie bei der Gewinnung von Steinen und Erden gibt es saisonale Effekte, welche durch die Typwoche nicht abgebildet werden.
- Für Ernährung & Tabak, Maschinenbau, Fahrzeugbau, sonstige Chemie und Metallerzeugung sind durch die Transformationspfade in Zukunft eine höhere Grundlast und weniger Volatilität zu erwarten, da größere Mengen an Prozesswärme durch Strom bereitgestellt werden, was die Grundlast erhöht.
- Bei Ernährung & Tabak, Grundstoffchemie und Papiergewerbe gibt es relevante Mengen an Eigenerzeugung, sodass der hier dargestellte Stromverbrauch nicht gleichzusetzen ist mit dem Strombezug aus dem Netz.
- Für weitere Berechnung des Auftraggebers kann für einen Feiertag vereinfacht das Stundenprofil von einem Sonntag verwendet werden.

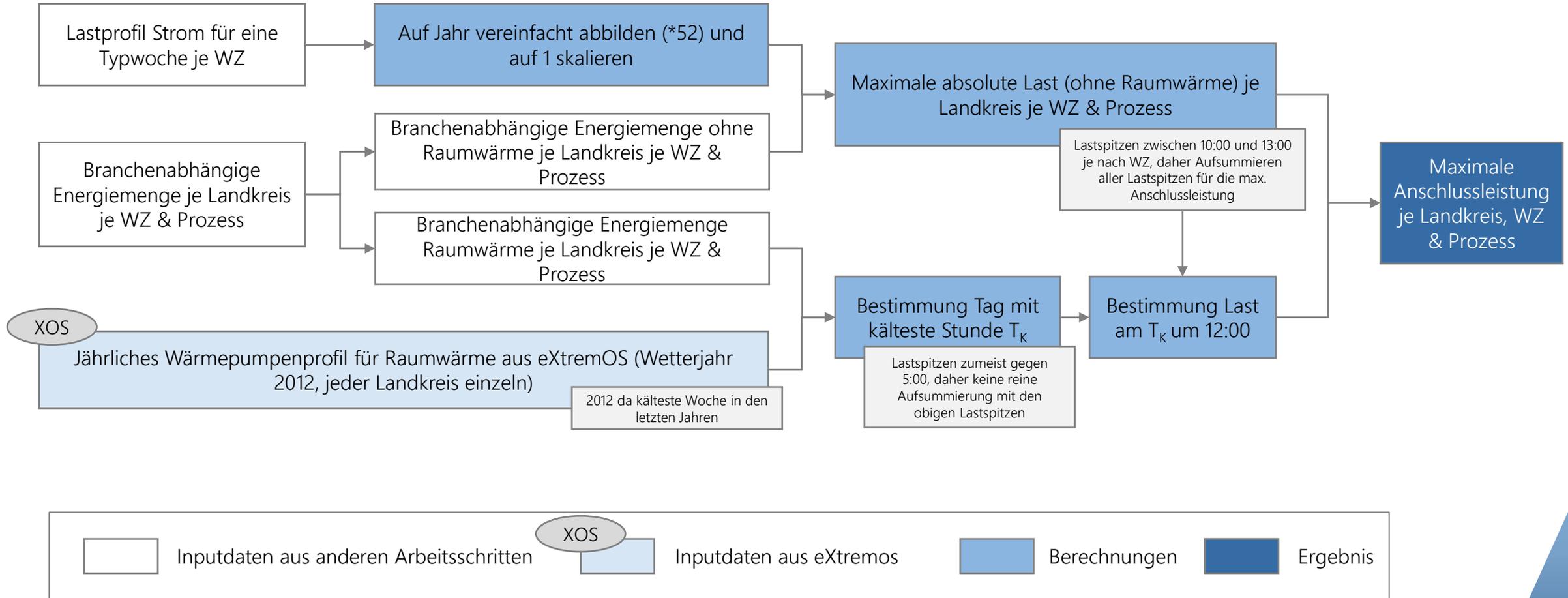
Zusammenfassen von Lastprofilen für weitere Berechnungen



Die Zusammenführung erfolgt anhand der Energiemengen je Wirtschaftszweig aus der AGE B /AGE B-01-20/. Das Verhältnis der Wirtschaftszweige kann sich über die Jahre verschieben; dieser Effekt findet in dieser Studie allerdings keine Berücksichtigung.

Für Prozesse werden immer die detaillierten Lastprofile verwendet, für die sonstigen Verbräuche in dem Wirtschaftszweig das zusammengefasste Lastprofil.

Methodik: Berechnung der max. Anschlussleistung je Landkreis



Diskussion

Die entwickelten Lastprofile und die daraus resultierende max. Anschlussleistung weisen einige Limitationen auf, welche im Folgenden zusammengefasst werden:

- Änderungen der zeitlichen Charakteristik aufgrund der Transformationen werden nicht quantitativ berücksichtigt, sondern nur Trends qualitativ aufgezeigt.
- Wirtschaftszweige mit Batchprozessen werden als Strichprofil dargestellt.
- Je nach Landkreis sind Branchen-WZ auf Landkreisebene aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisse nur bedingt geeignet. Einzelne Standorte können stark von Branchen-Lastprofilen abweichen.
- Einige Wirtschaftszweige (Papier, Ernährung und Grundstoffchemie) weisen relevante Eigenerzeugung auf, sodass diese Lastprofile nicht dem Strombezug gleichgesetzt werden können.
- Grundsätzlich ist keine Saisonalität berücksichtigt, was vor allem bei den Wirtschaftszweigen Gewinnung von Steinen und Erden, Verarbeitung von Steinen und Erden und Ernährung & Tabak eine Vereinfachung ist.

Um diese Limitationen abzufangen, ist es eine Möglichkeit, die Ergebnisse mit einem Sicherheitsfaktor (z.B. 10 %) zu skalieren.

5. Regionalisierung des Status quo

Regionaler industrieller Stromverbrauch nach Wirtschaftszweig und stromintensivem Prozess

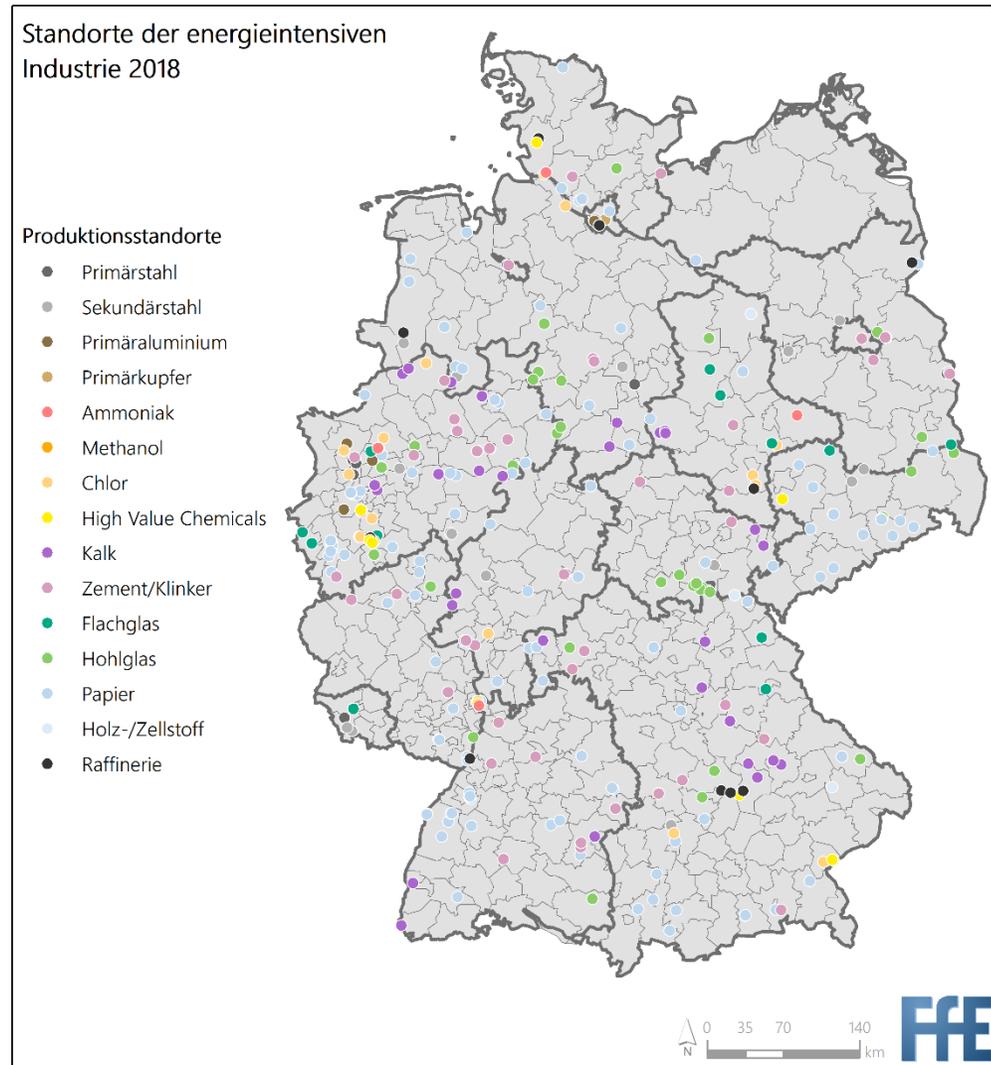


Für das **Basisjahr 2018** wird eine **Regionalisierung** des industriellen Stromverbrauchs **auf Landkreisebene** durchgeführt. Dabei werden georeferenzierte Standorte und Produktionsmengen der energieintensiven Industrie sowie regional aufgelöste Statistiken zum industriellen Stromverbrauch und zu Erwerbstätigen der Wirtschaftszweige als Eingangsdaten verwendet.

Zunächst erfolgt dafür eine **Aufbereitung der Eingangsdaten**. Dies beinhaltet die Ausweisung der standortscharfen Produktionsmengen für das Jahr 2018 sowie eine synthetische Vervollständigung der regionalen Statistiken, sofern Werte aus Gründen der Geheimhaltung nicht veröffentlicht werden.

Die Ausweisung des regionalen Stromverbrauchs erfolgt **differenziert nach stromintensivem Prozess und nach Wirtschaftszweig** (WZ 2008). Ersterer wird zunächst aus den Produktionsmengen und prozessspezifischen Verbräuchen berechnet. Der übrige Stromverbrauch im Wirtschaftszweig wird in einem iterativen Verfahren anhand der Beschäftigtenzahlen verortet, wobei sowohl die Konsistenz zur regionalen und nationalen Stromverbrauchsstatistik als auch die Meldungen der Übertragungsnetzbetreiber zu vereinzelt Großabnehmern gewahrt bleiben.

Eingangsdaten: Standorte der energieintensiven Industrie



Der regionale Verbrauch stromintensiver Prozesse wird anhand der **Produktionsmengen je Standort** und den jeweiligen **spezifischen Stromverbräuchen** (siehe Kapitel 2) berechnet.

Die Produktionsstandorte stammen aus unterschiedlichen v.a. branchenspezifischen Quellen, Studien, der E-PRTR-Emissionsdatenbank und dem Marktstammdatenregister. Die Produktionsmengen je Standort stellen für das Jahr 2018 eine berechnete Größe dar, basierend auf der Jahresproduktion in Deutschland und verteilt über die Produktionsmengen der Standorte aus Jahren, für die diese Information ermittelt werden konnte.

Die Karte zeigt die Standorte der energieintensiven Industrie, die im Rahmen der Studie berücksichtigt wurden (Überlagerungen von Standorten möglich).

Vergleich der statistischen Eingangsdaten zum Stromverbrauch

Statistik auf Deutschlandebene¹: Stromverbrauch nach Wirtschaftszweigen

Statistisches Bundesamt (Destatis): Tabelle 43531-0002

Energieverwendung der Betriebe im Verarb. Gewerbe Deutschland				
Jahr WZ2008 (ausgewählte Positionen): Energie	Eigene Stromerzeugung (netto)	Strombezug (einschließlich Ausland)	Stromabgabe (einschließlich Ausland)	Stromverbrauch
	MWh	MWh	MWh	MWh
2018				
WZ08-B-C Bergbau,Gewinnung v.Steinen u.Erden,Verarb.Gewerbe	54 642 817	209 905 292	26 034 061	238 514 048

Die dargestellten Statistiken zum Stromverbrauch im Verarbeitenden Gewerbe sind konsistent zueinander. Beide Statistiken weisen für das Basisjahr 2018 einen Stromverbrauch von ca. **238,5 TWh** aus.

Gemäß der Statistik wird der Stromverbrauch als die Eigenstromerzeugung und der Strombezug abzüglich der Stromabgabe verstanden.

$$\text{Stromverbrauch} = \text{Eigenstromerzeugung} + \text{Strombezug} - \text{Stromabgabe}$$

Statistik auf Landkreisebene²: Industrieller Stromverbrauch ohne WZ

Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Deutschland: Tabelle: 43531-01-02-4

Jahreserhebung ü. die Energieverwendung der Betriebe im Verarbeitendem Gewerbe								
Jahr Kreise und kreisfreie Städte	Energieverbrauch (einschl. nichtenergetischem V.)							
	Energieträger							
	insgesamt	Kohle	Heizöl	Erdgas	Erneuerbare Energien	Strom	Wärme	Sonstige Energieträger
	Tsd. MJ	Tsd. MJ	Tsd. MJ	Tsd. MJ	Tsd. MJ	Tsd. MJ	Tsd. MJ	Tsd. MJ
2018								
DG Deutschland	3 980 938 273	606 983 716	91 959 592	1 187 636 506	151 081 505	858 650 574	206 658 143	877 968 237

Beide Statistiken sind zudem **konsistent zur AGEB-Energiebilanz³**, auf der die Mantelzahlberechnung aufbaut. Die WZ-Klassifikation unterscheidet sich allerdings von den WZ2008 der Destatis-Statistik, weshalb die Ausweisung der zukünftigen Verbrauchsentwicklung für zusammengefasste WZ erfolgt.

$$\text{Strom} = 858 650 574 \text{ Tsd MJ} = 238 514 048 \text{ MWh}$$

¹/DESTA-03 22/
²/DESTA-04 22/
³/AGEB-01-20/

Syntheseverfahren: Berechnung fehlender Werte in den statistischen Eingangsdaten

Die **Regionalstatistik zum Gesamtstromverbrauch** im verarbeitenden Gewerbe¹ weist aus Gründen der Geheimhaltung für das Jahr 2018 in **24 Landkreisen fehlende Einträge** auf.

Zum **Vervollständigen der Statistik** werden die fehlenden Landkreiswerte durch vorhandene Werte aus vorausgegangenen oder späteren Jahren als Indikatoren eingesetzt (siehe Tabelle). Im Anschluss erfolgt eine Skalierung dieser Werte, um den Gesamtstromverbrauch auf Regierungsbezirk- bzw. Bundeslandebene zu treffen.

Für **sechs Landkreise** erfolgte in einem weiteren Arbeitsschritt eine **Anpassung** des Landkreisstromverbrauchs **auf Grundlage** der in den Landkreisen ermittelten **Prozessverbräuchen**. Von diesen erfolgt bei zwei Landkreisen eine zusätzliche Anpassung anhand der **ÜNB-Meldungen**.

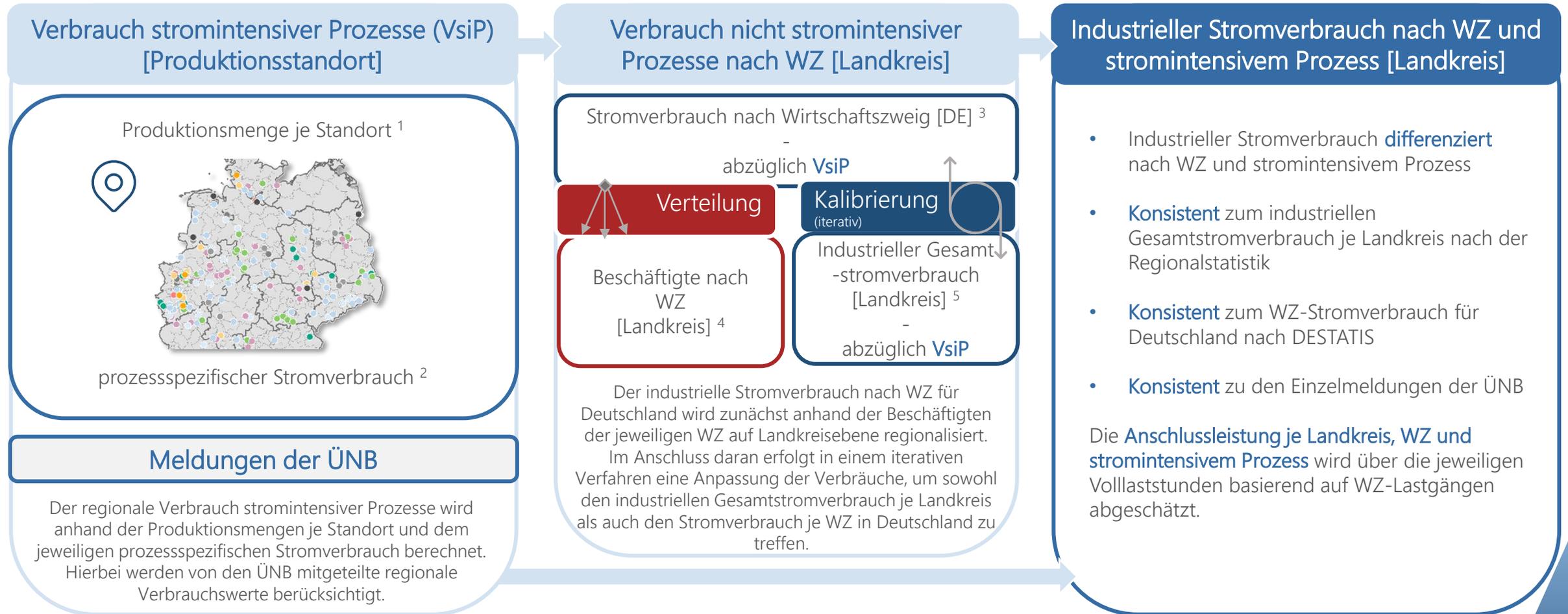
Die Statistik zu den **sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach WZ²** auf Landkreisebene weist ebenfalls fehlende Werte auf. Knapp **30 % der Einträge** in den WZ2008-Gruppen B und C werden ähnlich dem oben geschilderten Vorgehen **aus historischen statistischen Jahren abgeleitet**.

Aktuellstes Jahr der Veröffentlichung für Landkreise mit fehlenden Werten für das Jahr 2018

RB	AGS		Landkreis	Jahr Statistik	Anpassung durch	
	LK				Prozessverbrauch	ÜNB-Meldung
31	3157000	Peine		2012		
31	3103000	Wolfsburg		-		
33	3356000	Osterholz		2015		
33	3359000	Stade		2012		
34	3402000	Emden		2012		
34	3462000	Wittmund		2012		
34	3455000	Friesland		2012		
34	3405000	Wilhelmshaven		2012		
51	5116000	Mönchengladbach		2016	ja	
51	5113000	Essen		2012	ja	
55	5515000	Münster		2019		
55	5512000	Bottrop		2019		
91	9161000	Ingolstadt		2012		
91	9190000	Weilheim-Schongau		2012		
91	9180000	Garmisch-Partenkirchen		2019		
92	9279000	Dingolfing-Landau		2012		
92	9261000	Landshut		2017		
92	9262000	Passau		2012		
100	10042000	Merzig-Wadern		2019		
100	10046000	St. Wendel		2019		
120	12051000	Brandenburg an der Havel		-	ja	ja
120	12064000	Märkisch-Oderland		2005	ja	
120	12073000	Uckermark		2005	ja	
120	12065000	Oberhavel		2005	ja	ja

¹ DE-STATIS-0422
7/10/2018

Methodik zur Regionalisierung des Stromverbrauchs nach Wirtschaftszweig und stromintensivem Prozess

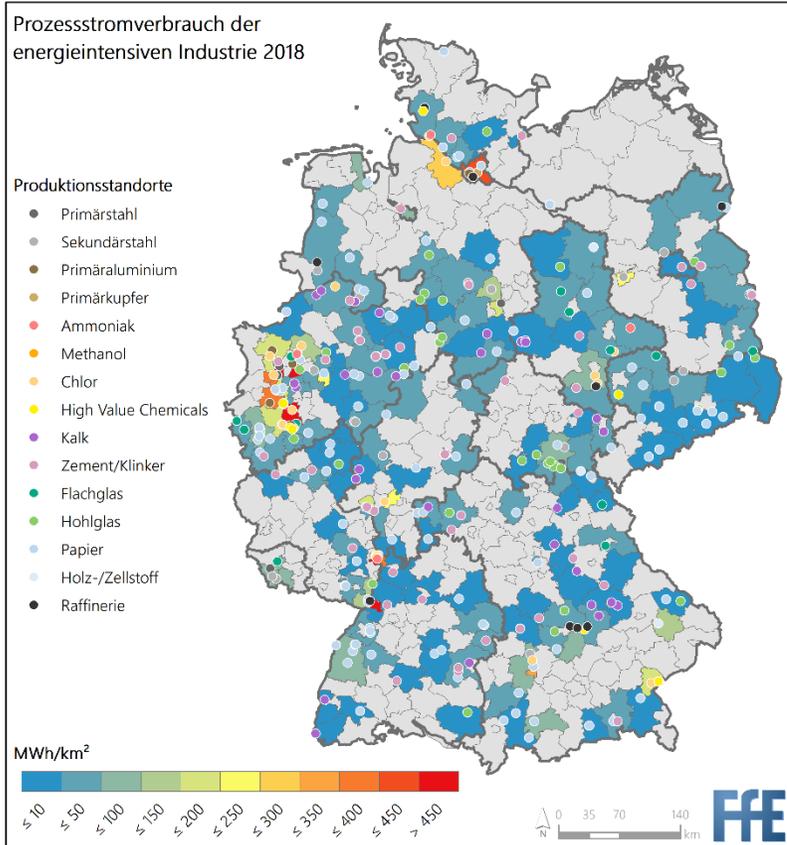


1 Standorte nach /EEA-01 22/, /BNETZA-18 20/, /AGORA-11 20/, /BRUNK-01 17/ und weiteren Quellen
 → Produktionsmengen - Kapazitäten aus unterschiedlichen v.a. branchenspezifischen Quellen
 2 /FFE-24 21/, /FFE-39 20/, /BMWI-01 19/ und eigene Berechnungen

3 /DESTATIS-03 22/
 4 /BA-01 21/ → Synthese fehlender Werte durch FfE
 5 /DESTATIS-04 22/ → Synthese fehlender Werte durch FfE

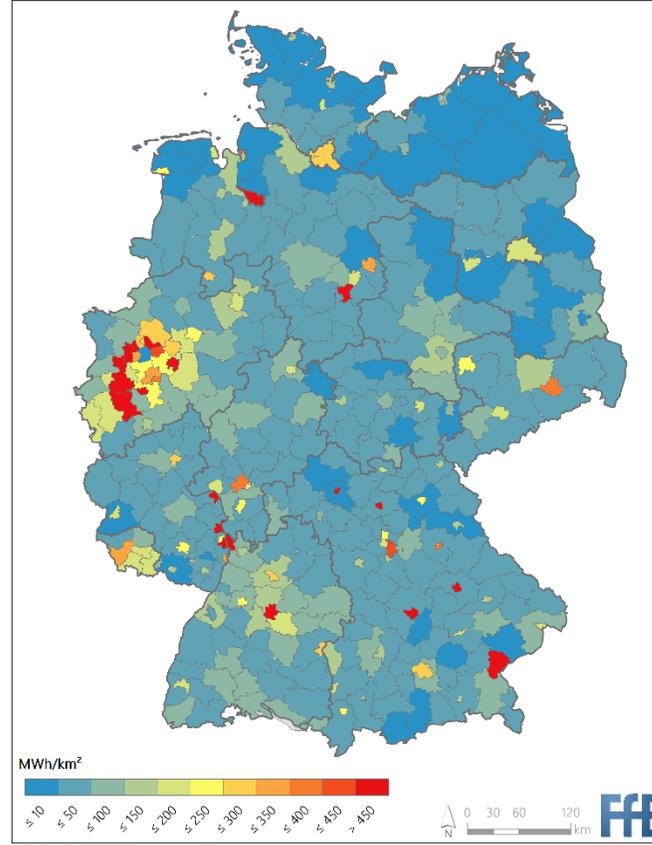
Regionaler industrieller Stromverbrauch im Basisjahr 2018

Verbrauch stromintensiver Prozesse



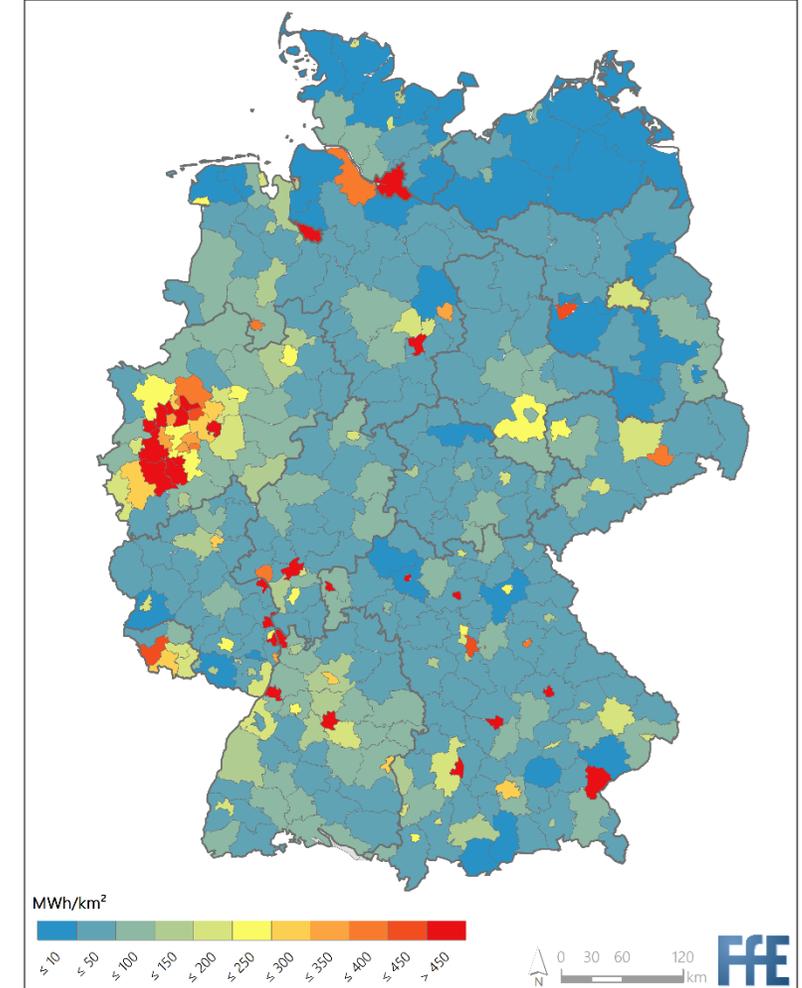
© GeoBasis-DE / BKG 2017 | Generalisierung: FFE e.V.

weiterer Stromverbrauch



© GeoBasis-DE / BKG 2017 | Generalisierung: FFE e.V.

Gesamtstromverbrauch



© GeoBasis-DE / BKG 2017 | Generalisierung: FFE e.V.

Die regionalen Stromverbräuche werden differenziert nach WZ und stromintensivem Prozess je Landkreis ausgewiesen. Das Ergebnis der **Stromverbrauchsregionalisierung für das Jahr 2018** ist in aggregierter Form flächenspezifisch dargestellt.

Abschlussbericht

6. Regionalisierung der Transformationspfade

Regionalisierung der Verbrauchsentwicklung



Die aus den Szenarien resultierenden **Strom-, H₂ und -derivatverbräuche sowie die Anschlussleistung** werden auf Landkreisebene nach Wirtschaftszweig und den betrachteten Prozessen differenziert ausgewiesen.

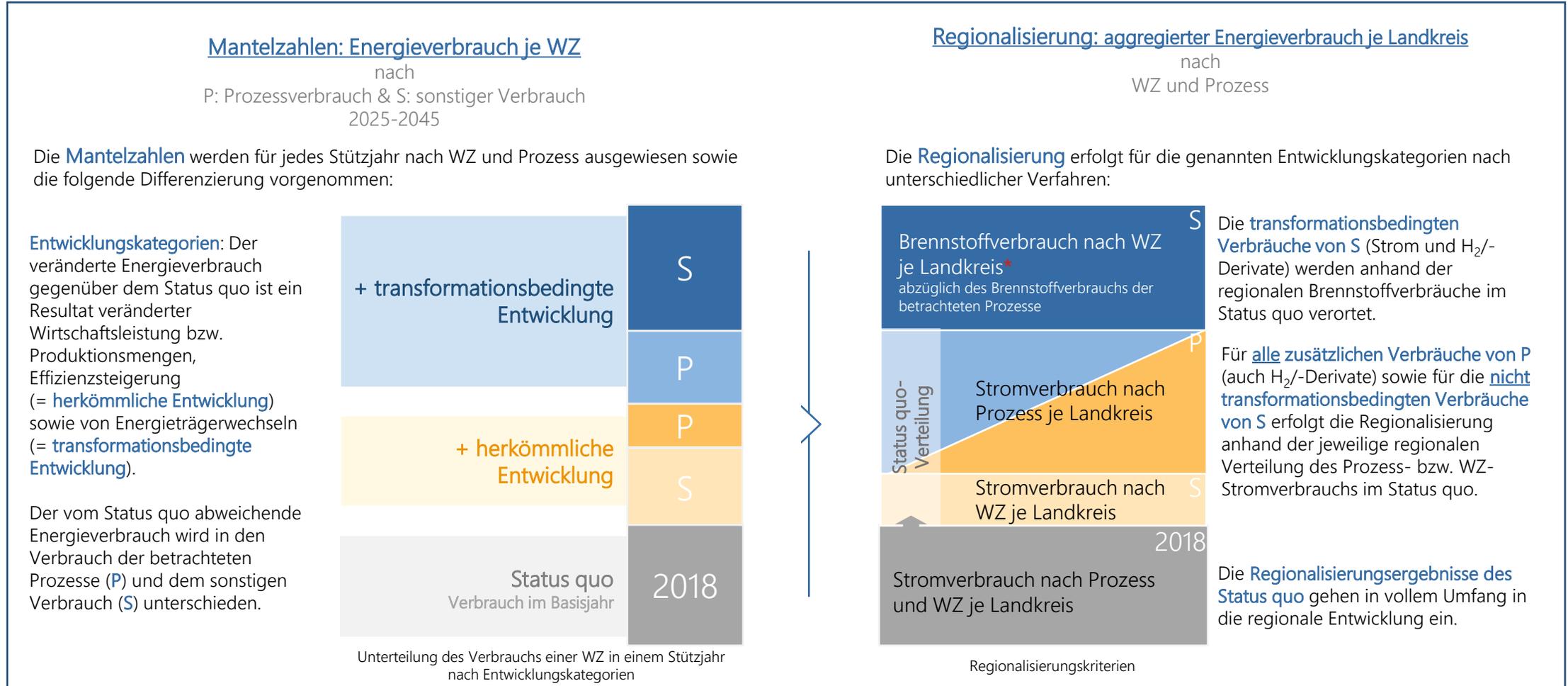
Die Regionalisierung berücksichtigt hierbei verschiedene **Verbrauchsentwicklungskategorien**, die den bereits seit dem Basisjahr bestehenden Verbrauch sowie die herkömmliche und transformationsbedingte Entwicklung beschreiben. Die herkömmliche Verbrauchsentwicklung resultiert dabei aus einer steigenden bzw. sinkenden Wirtschaftsleistung und steigender Effizienz, wohingegen die transformationsbedingte Verbrauchsentwicklung durch einen Energieträgerwechsel bedingt ist.

In Abhängigkeit der jeweiligen Verbrauchsentwicklungskategorie erfolgt die **Regionalisierung ausgehend vom Status quo** anhand der dort ermittelten regionalen Strom- und Brennstoffverbräuche der Wirtschaftszweige bzw. der betrachteten Prozesse. Eine **Verlagerung von Produktionsstandorten wird nicht unterstellt**.

Im Folgenden wird die Regionalisierungsmethodik zur Verbrauchsentwicklung erläutert sowie die **Verbrauchsentwicklung gegenüber dem Basisjahr 2018** kartographisch dargestellt.

Regionalisierungsmethodik

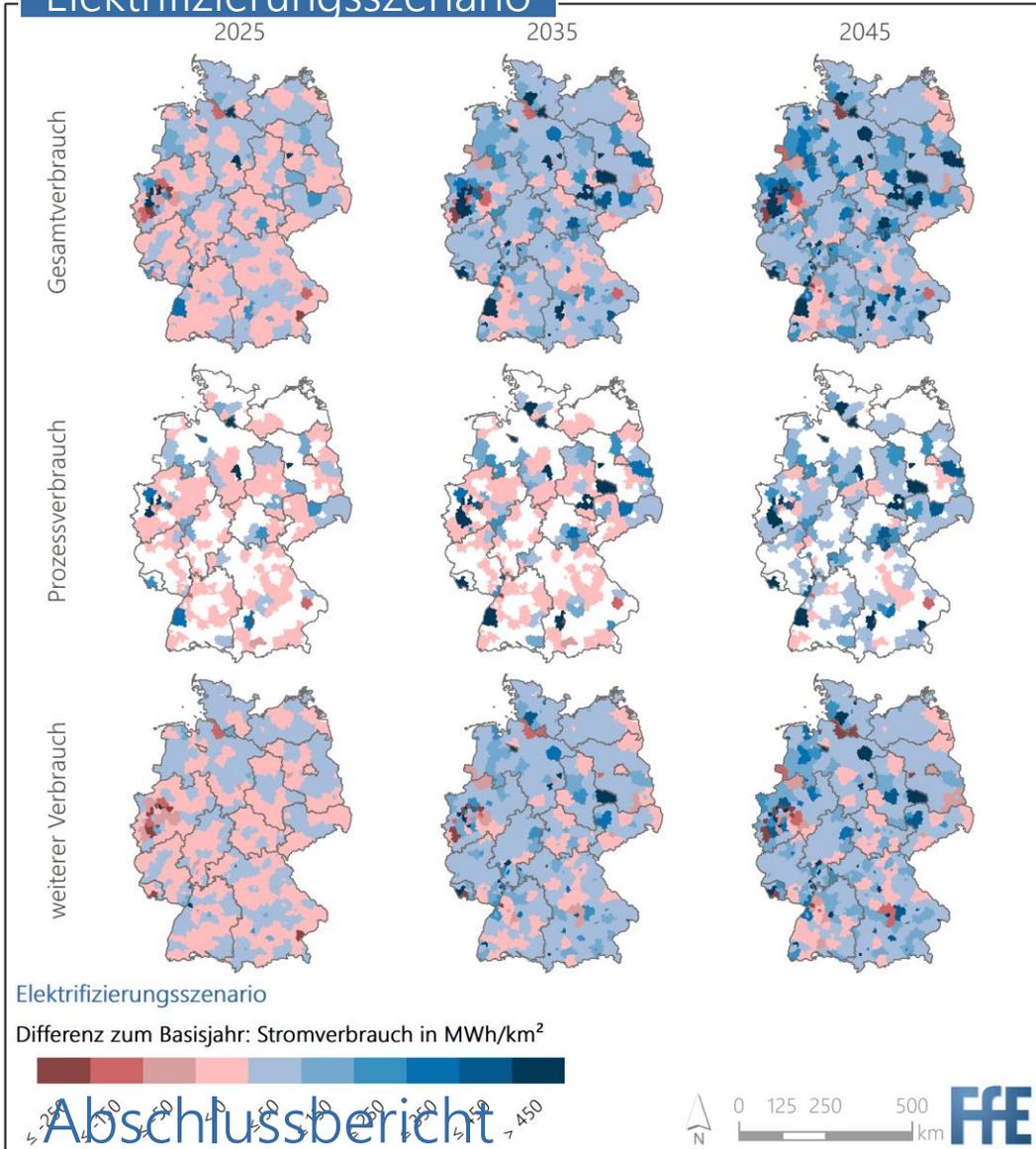
Schematische Darstellung der Methodik zur Regionalisierung der Strom- sowie H₂-/Derivat-Verbrauchsentwicklung



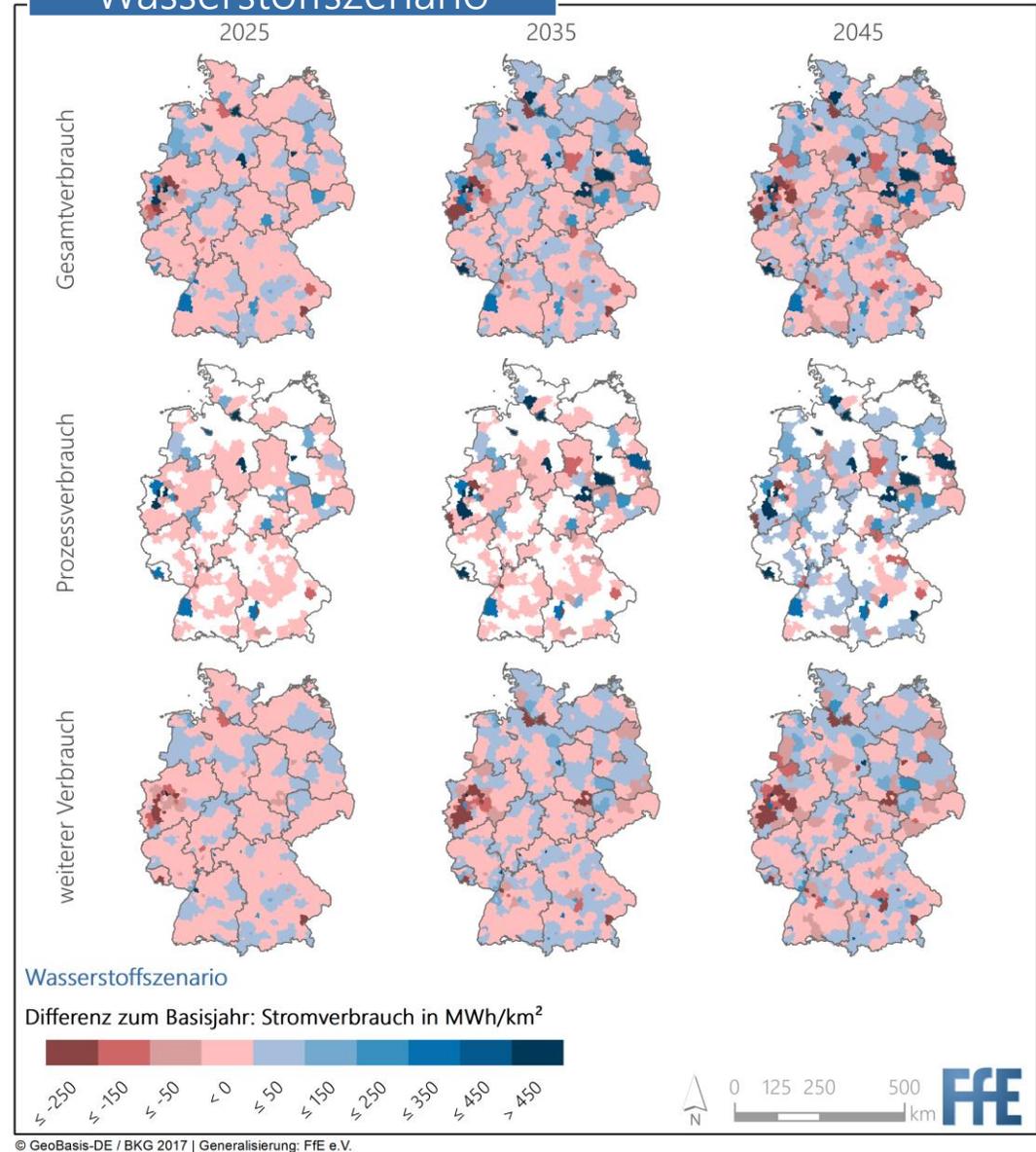
* **Regionaler Energieträgerverbrauch nach WZ:** Ähnlich der Methodik zur Ermittlung des „regionalen industriellen Stromverbrauchs nach WZ und stromintensivem Prozess“ in Kapitel 5 erfolgt eine solche Erhebung für alle weiteren Energieträger. Die Vollständigkeit der Eingangsdaten (Regionalstatistik-Tabelle 43531-01-02-4, /DESTATIS 04 22/) ist hierbei im Vergleich zum statistisch ausgewiesenen Stromverbrauchs in Abhängigkeit des Energieträgers geringer, weshalb die Daten einen höheren Anteil modellierter Verbräuche aufweisen. Die regionale Modellierung des Stromverbrauchs auf die WZ erfolgt wie auch beim Stromverbrauch über die Beschäftigtenzahlen nach WZ sowie den standortscharfen Produktionsmengen mit den jeweiligen spezifischen Energieträgerverbräuchen. Die Regionalstatistik weist den energetischen und nicht energetischen Verbrauch je Energieträger in Summe aus. Daher werden die Verbräuche als Indikatoren für die Regionalisierung verstanden.

Regionale Ergebnisse: Strom

Elektrifizierungsszenario

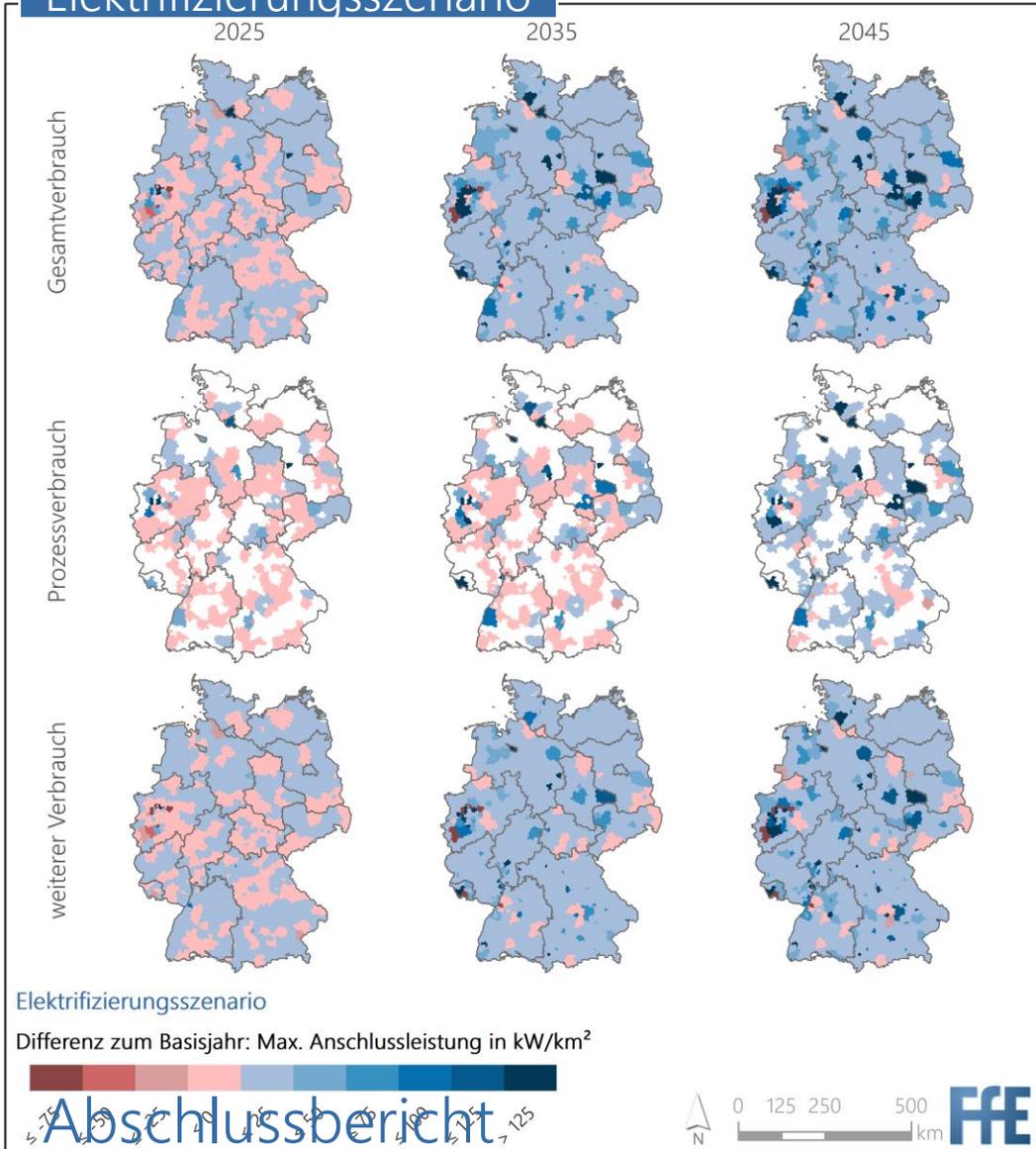


WasserstoffszENARIO

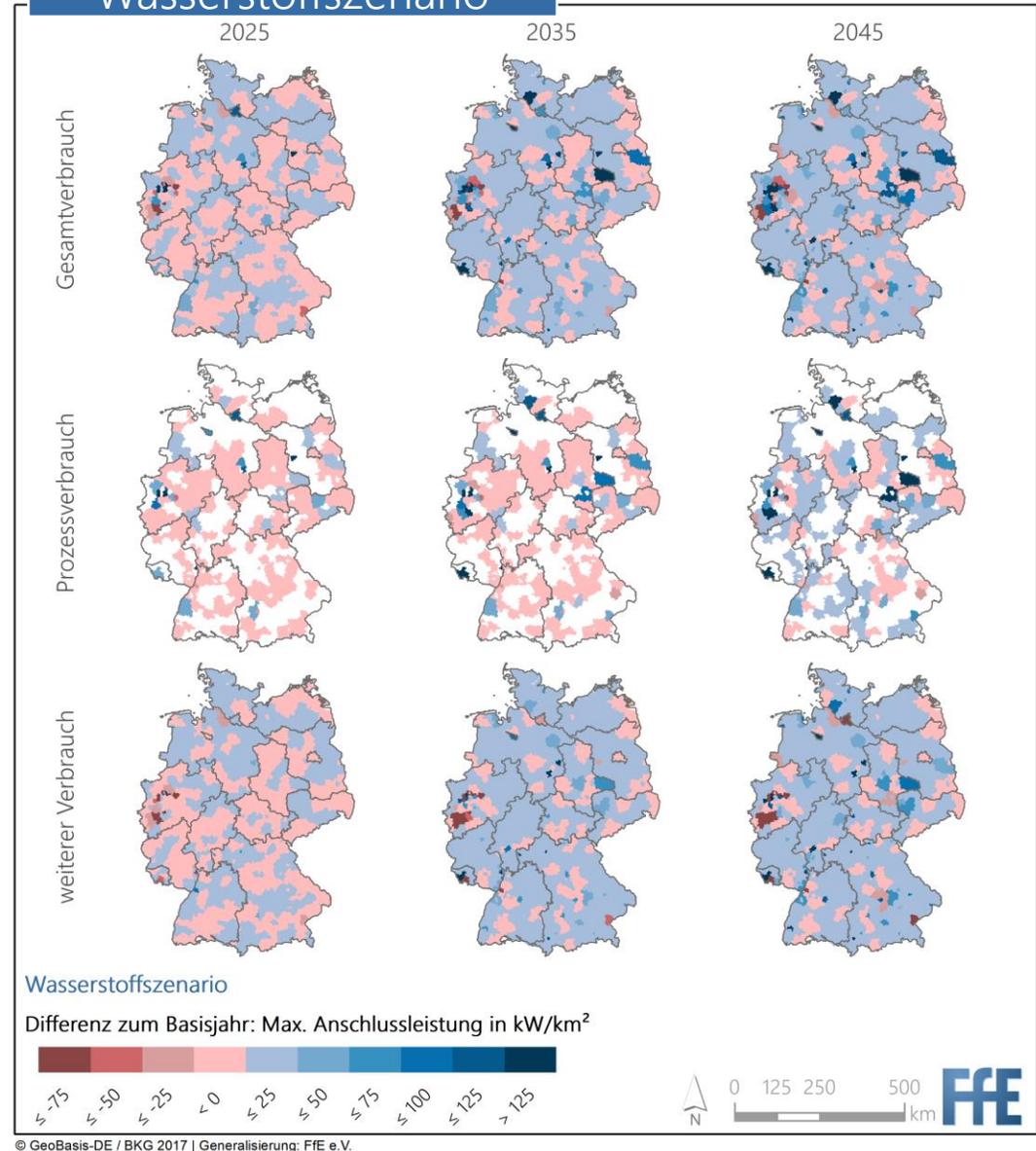


Regionale Ergebnisse: Maximale Anschlussleistung

Elektrifizierungsszenario

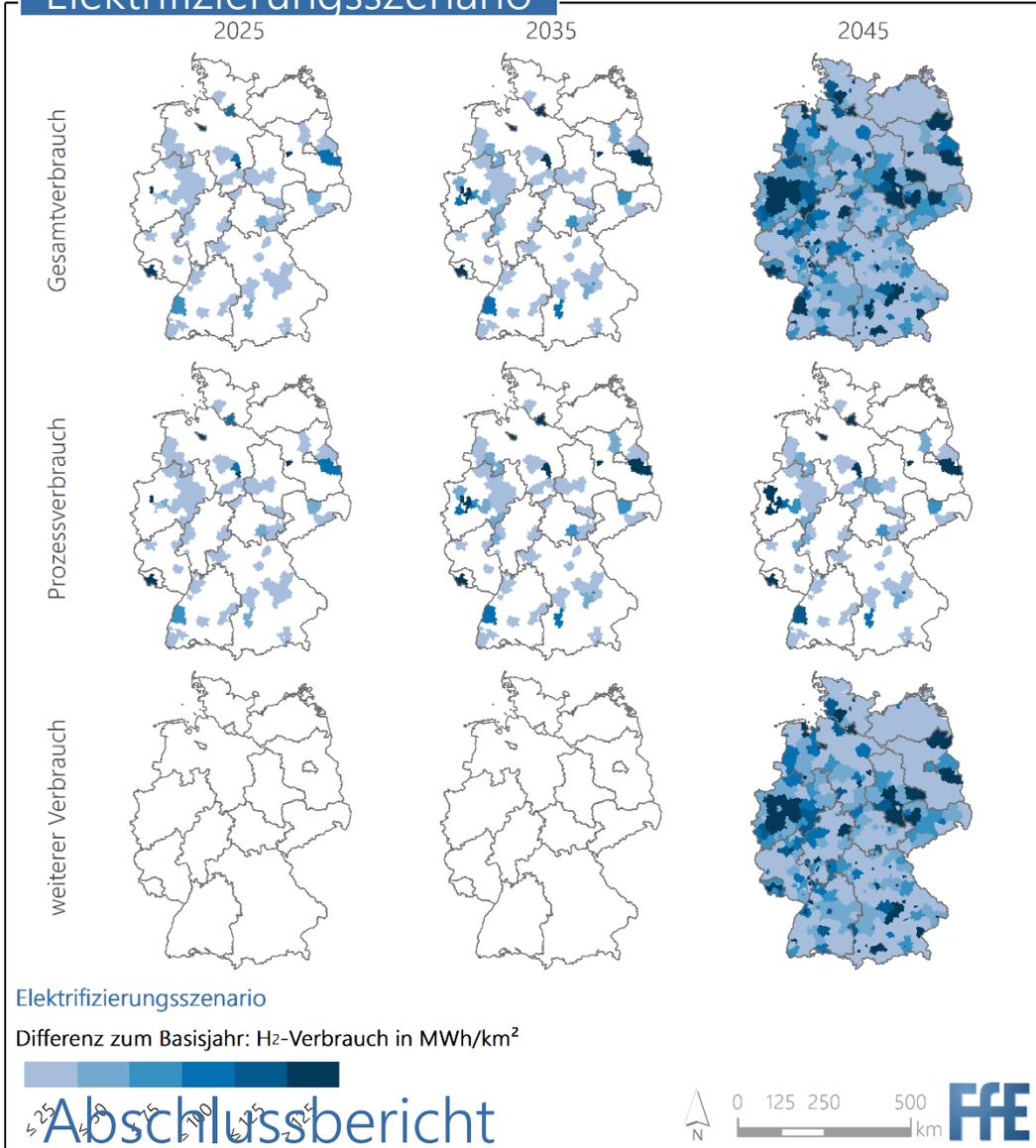


Wasserstoffsszenario

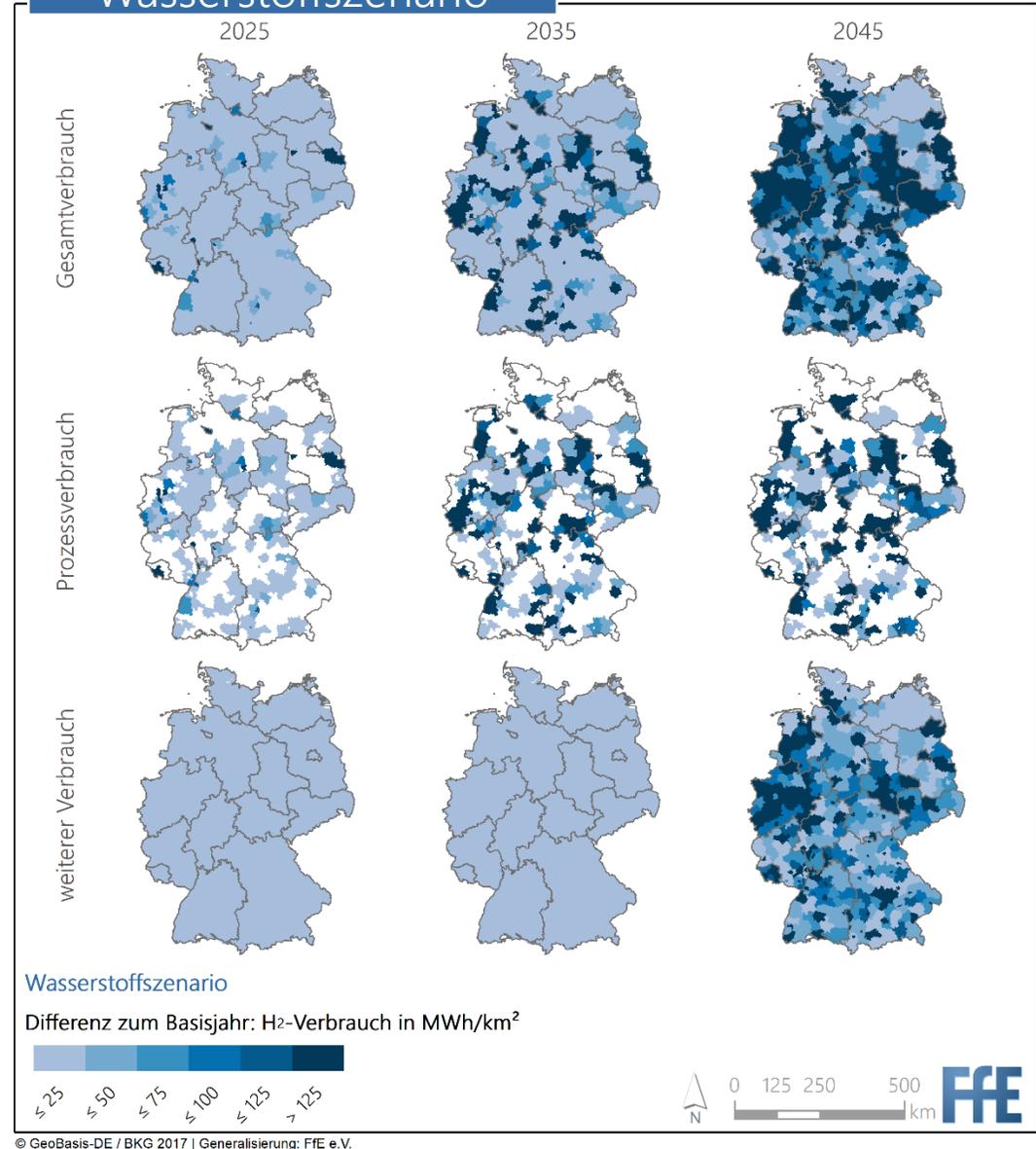


Regionale Ergebnisse: Wasserstoff

Elektrifizierungsszenario

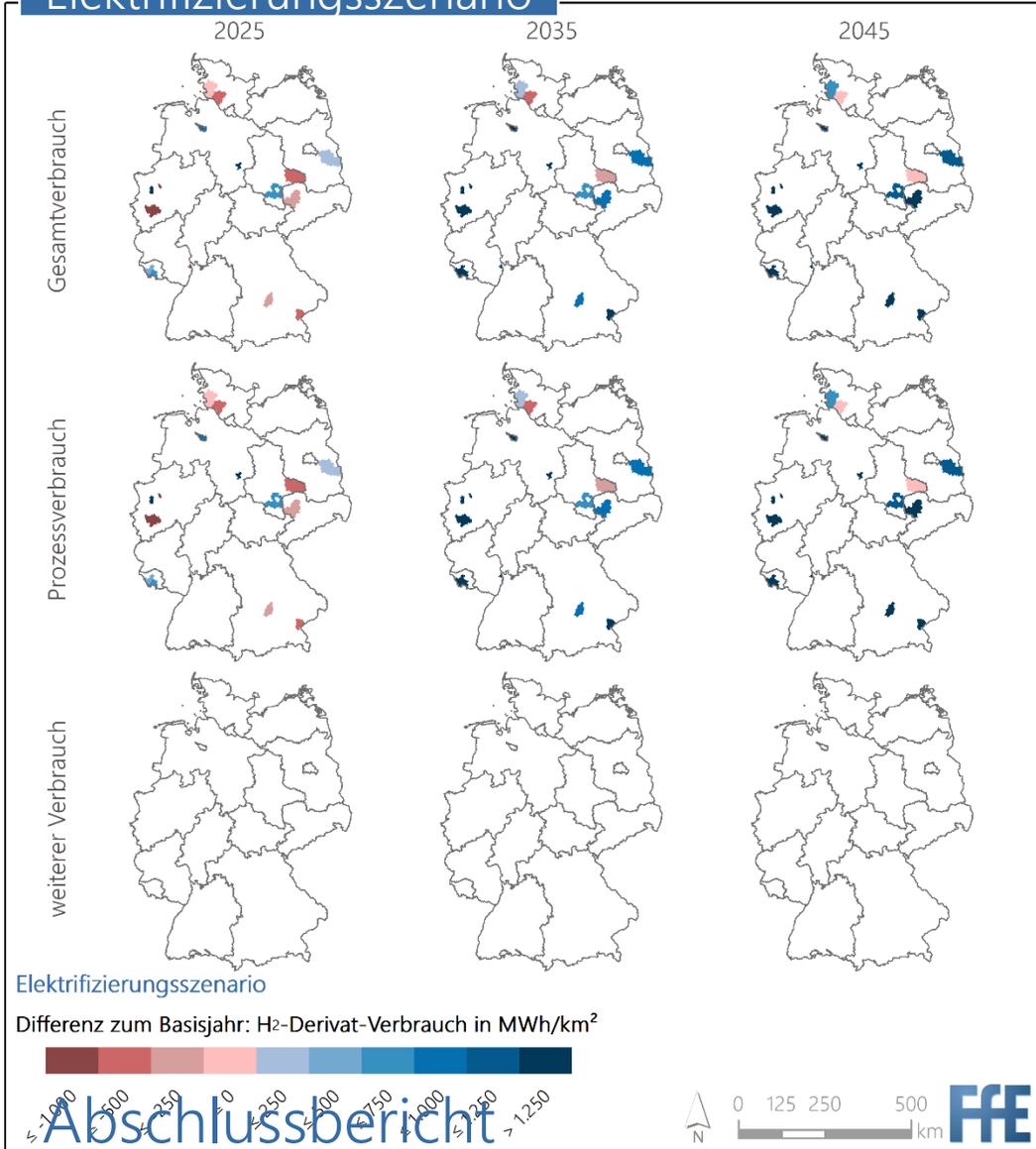


Wasserstoffsszenario

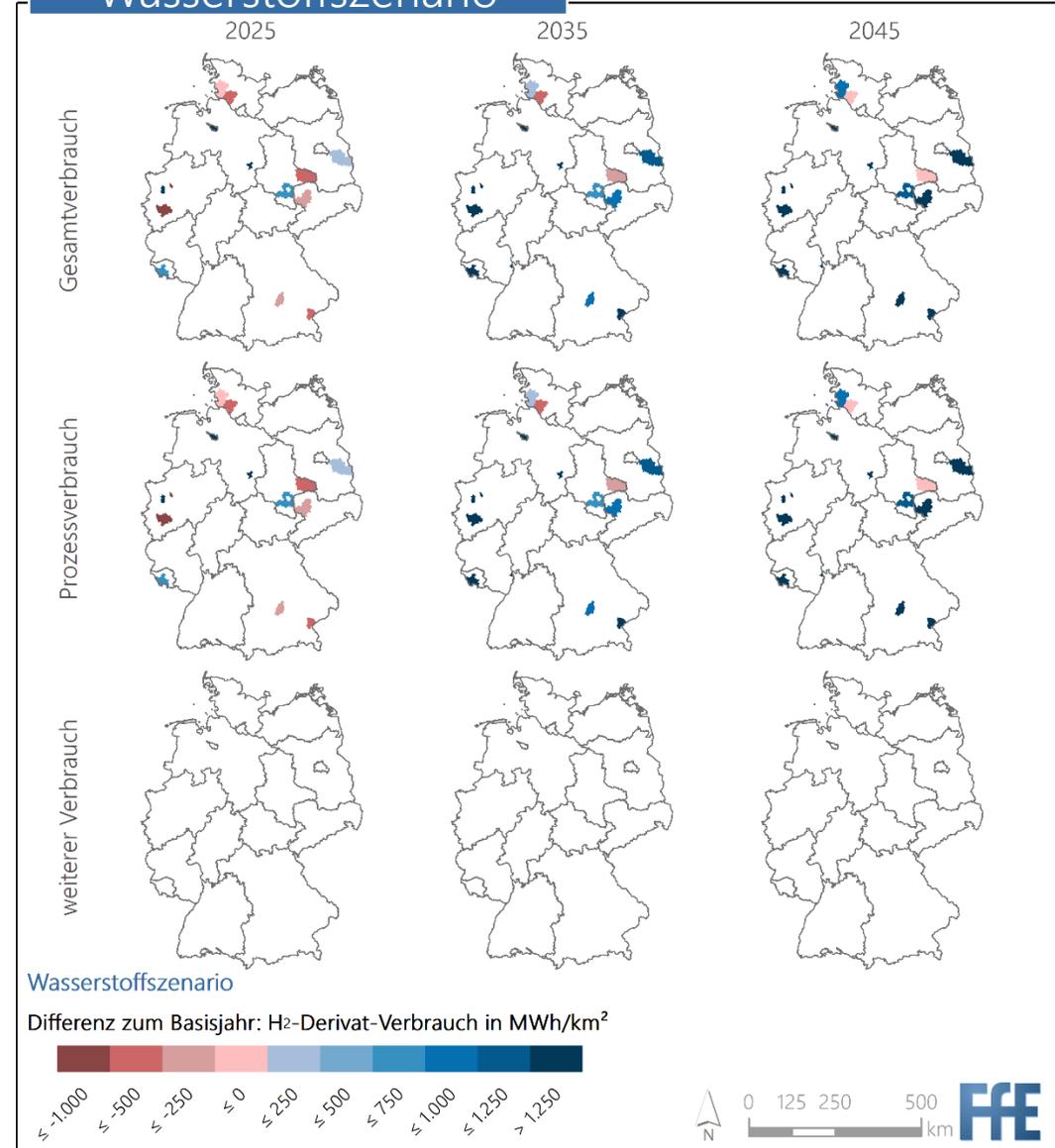


Regionale Ergebnisse: H₂-Derivate

Elektrifizierungsszenario



Wasserstoffszenario



Ergebnisse: Stromverbrauch und max. Anschlussleistung

Der **Stromverbrauch** ist in 2025 gegenüber dem Basisjahr aufgrund von Effizienzsteigerungen in vielen Regionen und insbesondere im Wasserstoffscenario niedriger. Die Chemieindustrie weist hierbei in Summe den höchsten Rückgang auf. Davon ausgenommen ist der Verbrauch bei der Herstellung von Methanol und Ammoniak. Dies ist beispielsweise am Ammoniakproduktionsstandort in Wittenberg (Thüringen) ersichtlich. Zwar erfolgt im Elektrifizierungsszenario insbesondere bei der Grundstoffchemie, Papier- und Glasherstellung eine zunehmende Elektrifizierung, die Effizienzsteigerung führt aber zu keinem extremen Verbrauchsanstieg. Exemplarisch ist dies an den Papierherstellungsstandorten in Sachsen zu erkennen. Transformationsbedingt weisen insbesondere Landkreise mit Standorten mit Sekundärstahlproduktion und der Grundstoffchemie eine verstärkte Verbrauchszunahme auf und zwar sowohl im Elektrifizierungs- als auch im Wasserstoffscenario. In letzterem wird deutlich früher Wasserstoff für die Prozesswärme eingesetzt, weshalb der Stromverbrauch gegenüber dem Basisjahr und dem Elektrifizierungsszenario in vielen Regionen geringer ist. Dies kann beispielsweise an Landkreisen mit Glasherstellung wie Neustadt an der Waldnaab (Bayern) oder im Landkreis Börde (Thüringen) nachvollzogen werden. An Standorten der Sekundärstahl- und Ammoniakproduktion ist die Verbrauchsentwicklung, wie im Elektrifizierungsszenario, zunehmend. Diesbezüglich können exemplarisch die Landkreise Ortenaukreis (Baden-Württemberg) und Ludwigshafen (Rheinland-Pfalz) benannt werden.

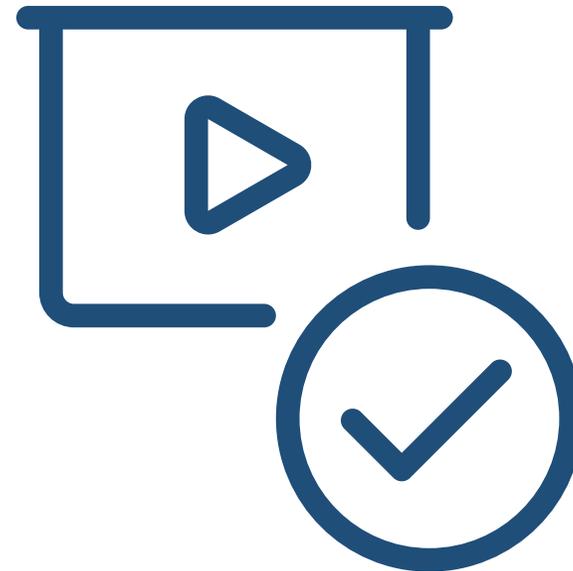
Die regionale Entwicklung der **maximale Anschlussleistung** vollzieht sich nicht in allen Landkreisen analog zur Stromverbrauchsentwicklung. Ausschlaggebend sind hier Anteile der WZ- bzw. Prozessverbräuche am jeweiligen Landkreisstromverbrauch.

Ergebnisse: H₂ und -Derivate

Wasserstoff wird im Elektrifizierungsszenario bis 2035 insbesondere für die Stahlherstellung sowie im geringem Maß für die Kalk-, Klinker und Primärkupferherstellung eingesetzt, weshalb sich der Verbrauch auf die Prozessstandorte konzentriert. Erst in 2045 wird in allen WZ Wasserstoff flächendeckend für die Prozesswärme eingesetzt. Dieser flächendeckende Einsatz von H₂ für die MT&HT-Prozesswärme vollzieht sich im Wasserstoffsszenario bereits ab 2025. Zusätzlich wird für die Deckung des Energiebedarfs im Wasserstoffsszenario in der Papier- und Glasproduktion H₂ benötigt, für die im Elektrifizierungsszenario Strom eingesetzt wird. Daher verteilt sich der H₂-Verbrauch gegenüber dem Elektrifizierungsszenario räumlich auf mehr Landkreise. In beiden Szenarien wird der Großteil des benötigten H₂ für die Primärstahlherstellung eingesetzt, weshalb sich der H₂-Verbrauch insbesondere auf die Landkreise Duisburg, Salzgitter, Bremen, den Regionalverband Saarbrücken, Saarlouis und Oder-Spree konzentriert.

Der Bedarf an **Wasserstoff-Derivaten** besteht ausschließlich an Produktionsstandorte von HVC, Primärstahl, Ammoniak und Methanol. Die räumliche Verteilung des Bedarfs ist in beiden Szenarien gleich. Eine zum Basisjahr rückläufige Bedarfsentwicklung in wenigen Landkreisen ist auf den Produktionsmengenrückgang im Zuge der Corona-Pandemie bei der Ammoniak- und HVC-Herstellung sowie auf einen geringeren stofflichen Wasserstoffverbrauch der Transformationstechnologie in der Ammoniakherstellung zurückzuführen.

7. Literaturverzeichnis



Literaturverzeichnis

- AGEB-01 20** Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2018: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=bilanz18d.xls; Berlin: AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2020 (überarbeitet: 2020).
- AGORA-07 19** Joas, Fabian et al.: Klimaneutrale Industrie – Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, Wuppertal: Agora Energiewende, 2019.
- AGORA-11 20** Schneider, Clemens et al.: Klimaneutrale Industrie – Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Berlin: AGORA Energiewende, 2020.
- BA-01 21** Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Wirtschaftsabteilungen der WZ 2008; Nürnberg: Bundesagentur für Arbeit, 2021.
- BMWI-01 19** Laufendes Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018–2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- BNETZA-18 20** Marktstammdatenregister – Öffentliche Marktakteursübersicht: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Akteur/Marktakteur/IndexOeffentlich>; Bonn: Bundesnetzagentur, 2020.
- BRUNK-01 17** Brunke, Jean-Christian: Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland - Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Dissertation. Herausgegeben durch die Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, geprüft von Voß, Alfred und Sauer, Alexander: Stuttgart, 2017.
- DECH-02 19** Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München, Frankfurt: Dechema, 2019.
- DECHEMA-01 17** Bazzanella, Alexis et al.: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2017.
- DESTATIS-03 22** Energieverwendung der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe – Stromerzeugung, Strombezug, Stromabgabe, Stromverbrauch: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (Tabelle: 43531-0002); Wiesbaden: Statistische Bundesamt (Destatis), 2022.
- DESTATIS-04 22** Jahrerhebung über die Energieverwendung der Betriebe im Verarbeitendem Gewerbe – Energieverbrauch, Jahressumme – regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte (Tabelle: 43531-01-02-4); Düsseldorf: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2022.
- DFBE-10 19** Ireson, R et al.: Alternative Fuel Switching Technologies for the Glass Sector – Final Report – BEIS Industrial Fuel Switching Phase 2. UK: Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2019.
- EEA-01 22** Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC) No 166/2006 ; Copenhagen: European Environment Agency (EEA), 2022.

Literaturverzeichnis

- FFE-149 19** Hübner, Tobias et al.: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor - Branchensteckbrief der Keramikindustrie. Stuttgart, München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2019.
- FFE-119 20** Gotzens, Fabian et al.: DemandRegio – Harmonisierung und Entwicklung von Verfahren zur regionalen und zeitlichen Auflösung von Energienachfragen - Abschlussbericht. Jülich, Berlin, München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2020.
- FFE-39 20** Hübner, Tobias; Serafin von Roon: Modellierung kosteneffizienter Transformationspfade der deutschen Industrie. In: Energieinnovation 2020 - 16. Symposium Energieinnovation 16(20). München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2020.
- FFE-24 21** Guminski, Andrej et al.: eXtremOS Summary Report – Modeling Kit and Scenarios for Pathways Towards a Climate Neutral Europe. Munich: Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2021.
- GUM-02 21** Guminski, Andrej: CO₂ Abatement in the European Industry Sector - Evaluation of Scenario-Based Transformation Pathways and Technical Abatement Measures. Dissertation. Published by the Technical University Munich (TUM) - TUM School of Engineering and Design: Munich, Germany, 2021.
- IRENA-01 21** Innovation Outlook: Renewable Methanol. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
- JRCSPR-01 15** Barthe, Pascal et al.: Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT) für das Raffinieren von Mineralöl und Gas - Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas. Luxembourg: JRC Science for Policy Reports, 2015.
- OTTO-01 17** Otto, Alexander et al.: Power-to-Steel - Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry in: Energies (4), 2017, S. 451. Basel: MDPI, 2017. DOI: 10.3390/en10040451
- RUB-01 15** Jasper, Sarah et al.: A Techno-Economic Comparison between Two Methanol-to-Propylene Processes. Bochum, Texas: Ruhr-University Bochum, 2015.
- SAUIG-02 21** Borgnäs, Kajsa et al.: Branchenausblick 2030+: Papier- und Zellstoffindustrie. Berlin: Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2021.
- VDZ-01 20** Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien - Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 2020.
- WI-01 17** Arnold, Karin et al.: Technologiebericht 4.3 Power-to-liquids/-chemicals innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2017.



Andrej Guminski

Geschäftsführer

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH

Tel.: +49(0)89 15 81 21- 0

Email: aguminski@ffe.de



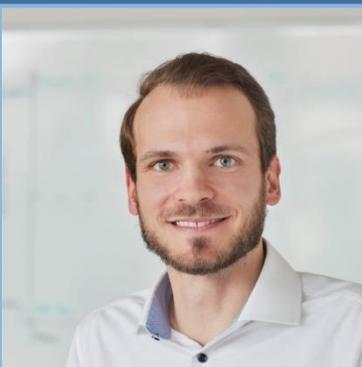
Fabian Jetter

Senior Geodata Analyst

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH

Tel.: +49(0)89 15 81 21- 0

Email: fjetter@ffe.de



Stefan Schmidt

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH

Tel.: +49(0)89 15 81 21- 0

Email: sschmidt@ffe.de



Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

Am Blütenanger 71 – 80995 München

Tel.: +49(0)89 15 81 21 – 0

Email: info@ffe.de

Internet: www.ffe.de

Twitter: [@FfE_Muenchen](https://twitter.com/FfE_Muenchen)