



Validierung des EEV der Studie im Vergleich zu den LFS O45

Teilbericht zum Projekt *Stromverbrauchsmodellierung
des Industriesektors im Kontext der Dekarbonisierung*

Impressum

Herausgeber



Am Blütenanger 71
80995 München
+49 (0)89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Teilbericht zum Projekt

Stromverbrauchsmodellierung des Industriesektors im
Kontext der Dekarbonisierung

Veröffentlicht am

19.06.2026

Projektleitung

Aïcha Platzdasch

Bearbeiter:innen

Aïcha Platzdasch

Stellv. wissenschaftlicher Leitung

Dr.-Ing. Andrej Guminski

Bitte zitieren als

FfE (2026): Stromverbrauchsmodellierung des
Industriesektors im Kontext der Dekarbonisierung:
Validierung des Endenergieverbrauchs der Studie im
Vergleich zu den Langfristszenarien O45.

Versionsnummer Vorlage: TL20230613

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Zielsetzung	5
1.1	Ziel des Kurzberichts	5
1.2	Gesamtentwicklung des Endenergieverbrauchs im Zieljahr 2045	5
2	Wirtschaftszweige mit überwiegend prozessunspezifischem Verbrauch	6
2.1	Unterschiede in den Stromverbräuchen in den Stromszenarien	6
2.2	Unterschiede in Stromverbräuchen in den Wasserstoffstoffszenarien	7
2.3	Unterschiede in Wasserstoffverbräuchen in den Stromstoffszenarien	7
2.4	Unterschiede in Wasserstoffverbräuchen in den Wasserstoffstoffszenarien	7
3	Wirtschaftszweige mit überwiegend prozessspezifischem Verbrauch	8
3.1	Grundstoffchemie	8
3.2	Metallerzeugung	8
3.3	Glas und Keramik, Steine und Erden	8
3.4	Nichteisen-Metalle, Papiergewerbe	9
4	Tabellarischer Anhang	11

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ziel des Kurzberichts

Ziel dieses Kurzberichts ist es, die Unterschiede in den Strom- und Wasserstoffverbräuchen je Wirtschaftszweig im Zieljahr 2045 zwischen den Langfristszenarien O45 (LFS) und den Szenarien der FfE systematisch zu erklären. Im Fokus stehen dabei sowohl die Strom- als auch die Wasserstoffszenarien. Die Unterschiede in den Strom- und Wasserstoffverbräuchen werden in einem Ampelsystem bewertet.

- **Grün:** Unterschiede lassen sich methodisch/bilanziell begründen (z. B. verändertes Startjahr)
- **Gelb:** begründete Annahmen, Unterschiede liegen in Szenariorahmen und Technologieannahmen (z. B. BWS, Elektrifizierungsraten, Technologieeffizienz)
- **Rot:** unsicher, über Ursachen der Unterschiede können nur Vermutungen getroffen werden

1.2 Gesamtentwicklung des Endenergieverbrauchs im Zieljahr 2045

Auf aggregierter Ebene weisen die Langfristszenarien (LFS) gegenüber den FfE-Szenarien im Zieljahr 2045 deutlich höhere Endenergieverbräuche (EEV) auf. Dies gilt sowohl für die Strom- als auch für die Wasserstoffszenarien:

- Bei den **Stromverbräuchen im Jahr 2045** liegen die LFS **14 bis 24 % über den FfE-Werten**. In den Wasserstoffszenarien ist der Unterschied geringer als in den Stromszenarien.
- Die **Wasserstoffverbräuche** unterscheiden sich um **64 bis 135 %**.

Diese Unterschiede werden maßgeblich durch strukturelle Annahmen bestimmt:

1. **Höherer fossiler Energieeinsatz im Startjahr** der LFS (insbesondere Erdgas liegt im LFS-Startjahr 2021 25 % über dem FfE-Startjahr 2023),

2. **optimistischere Wachstumsannahmen der Bruttowertschöpfung** (durchschnittlich ca. 1,4 % pro Jahr gegenüber ca. 0,2 % im FfE-Ansatz),
3. **optimistischere Annahmen zur Produktionsmengenentwicklung** in der energieintensiven Industrie und **höherer inländischer Produktion statt Importen** in der **Grundstoffchemie**.
4. **extremere Elektrifizierungs- bzw. Wasserstoffeinsatzraten** in den LFS (außer bei der High Value Chemicals Herstellung). Die LFS gehen von einem sinkenden **Biomasseeinsatz** aus. Die FfE-Szenarien gehen davon aus, dass die energetische Biomassenutzung sektorübergreifend auf dem heutigen Niveau bleibt. Da der Einsatz im Verkehrssektor sinkt, steigt der Biomasseeinsatz in der Industrie. Insbesondere in den Wasserstoffszenarien werden mit abnehmender Elektrifizierung zunehmend sowohl Wasserstoff als auch in geringerem Maße Biomasse eingesetzt.

Im Folgenden werden diese Effekte nach Wirtschaftszweiggruppen differenziert analysiert.

Die für den Vergleich notwendigen Daten und zugehörigen Quellen können dem Industriebericht und Szenarioexplorer der LFS O45 bzw. dem FfE-Abschlussbericht des Projekts *Stromverbrauchsmodellierung des Industriesektors im Kontext der Dekarbonisierung* entnommen werden.

2 Wirtschaftszweige mit überwiegend prozessunspezifischem Verbrauch

Zu Gruppe der Wirtschaftszweige (WZ) mit ausschließlich prozessunspezifischem EEV zählen

- die Metallbearbeitung,
- sonstige Chemie,
- Gewinnung von Steinen und Erden,
- Gummi- und Kunststoffwaren,
- der Maschinenbau und
- Fahrzeugbau sowie
- - mit primär prozessunspezifischem Verbrauch - Ernährung und Tabak.

In den WZ ergibt sich der EEV aus der Kombination von

- Strom- und Erdgasverbräuchen im Startjahr,
- der Bruttowertschöpfungsentwicklung (BWS) und Energieintensität inkl. Effizienzgewinnen,
- der Elektrifizierungsraten in den Szenarien und
- der Nutzungsgrade der Wärmetechnologien.

2.1 Unterschiede in den Stromverbräuchen in den Stromszenarien

In den Stromszenarien weisen die LFS in allen prozessunspezifischen WZ höhere Stromverbräuche auf als die FfE-Szenarien. Die Abweichungen reichen von einstelligen Prozentwerten, bei Ernährung und Tabak, bis hin zu sehr hohen Differenzen, etwa im Fahrzeugbau oder in der Metallbearbeitung. Im FfE-eigenen Sektormodell Industrie „Smlnd“ werden die EEV der Wirtschaftszweige mit prozessunspezifischen Verbräuchen über die EEV im Startjahr und die BWS gekoppelt mit der Energieintensität skaliert („Baseline“-Entwicklung). Zusätzlich werden fossile EEV transformiert (elektrifiziert oder auf Biomasse- und Wasserstoff-befeuerte Wärmebereitstellung umgestellt). Folglich beeinflussen all diese Faktoren die EEV im Zieljahr:

- **Höhere Strom- und fossile Verbräuche**, insbesondere von Erdgas, **im Startjahr**: Selbst bei gleichen Annahmen zur BWS und Energieintensität würden die EEV im Zieljahr unterschiedlich skaliert ausfallen. Wenn die fossilen EEV in der Baseline-Entwicklung höher ausfallen, müssen mehr fossile Verbräuche

elektrifiziert werden. Das fällt vor allem ins Gewicht, wenn nicht in der Niedertemperatur, d.h. nicht mit hohen Effizienzgewinnen, elektrifiziert wird. [Vergleich der Startjahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

- **Höhere BWS in den LFS**: Besonders stark wirkt sich dies im Fahrzeugbau aus, wo die LFS von bis zu 50 % höherer wirtschaftlicher Aktivität im Zieljahr ausgehen. Die geringsten Abweichungen treten in der Metallbearbeitung auf mit 9% höherer BWS in den LFS in 2045. Bei den anderen WZ liegen die Abweichungen im zweistelligen Bereich.¹ Die BWS ist inflationsbereinigt auf das Startjahr der Modellierung. [Vergleich der BWS und Energieintensität je WZ siehe Anhang]
- **Abweichende Annahmen zur Energieintensität**: Die Energieintensität koppelt EEV und BWS. Die Energieintensität kann sich durch verschiedene Faktoren verändern, darunter Effizienzgewinne. Während die FfE von sinkenden Energieintensitäten aufgrund historischer Effizienztrends ausgeht, unterstellen die LFS der Metallbearbeitung eine steigende Energieintensität, in den anderen WZ ebenso eine fallende.
- **Geringere Nutzungsgrade von Wärmepumpen in den LFS**: Die LFS nehmen einen Nutzungsgrad von 2,83 für Wärmepumpen an (Vergleich FfE: 3,5). Das fällt vor allem ins Gewicht, wenn in der Niedertemperatur elektrifiziert wird. WZ mit überwiegend Wärme im Niedertemperaturbereich sind Ernährung und Tabak und Maschinenbau.
- **Unterschiedliche Elektrifizierungsraten in den Szenarien**: In den FfE-Szenarien ist vorgegeben, dass < 100 °C mit COP=3 100% (Strom) bzw. 90% (Wasserstoff-Szenario) elektrifiziert wird. LFS O45 Strom geht auch von einer reinen Elektrifizierung (COP unbekannt) aus. Für das Szenario LFS O45 H2 sind die Anteile nicht bekannt. Sie werden im

¹ Quelle der FfE-Szenarien: Treibhausgas-Projektionen 2026

Unterschied zum FfE-Modell nicht exogen vorgegeben. In der Mitteltemperatur von 100 °C – 500 °C wird in den FfE-Szenarien mit COP 2,2 90 % bzw. 50 % elektrifiziert. In der Hochtemperatur > 500 °C mit 50 % bzw. 10 %.

In den Stromszenarien lassen sich die höheren Stromverbräuche in den LFS überwiegend durch die Baseline-Entwicklungen erklären.

- Ampel auf **Gelb** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

2.2 Unterschiede in Stromverbräuchen in den Wasserstoffstoffszenarien

Im LFS O45 H2 sind die Stromverbräuche nicht so viel höher, wie die Baseline-Entwicklung (siehe Kapitel 2.1) vermuten lassen würde. Deshalb kann man von einer geringeren Elektrifizierungsrate ausgehen.

- Ampel auf **Gelb** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

2.3 Unterschiede in Wasserstoffverbräuchen in den Stromstoffszenarien

Ein Teil der unterschiedlichen Wasserstoffverbräuche lässt sich durch in Kapitel 2.1 genannten Einflussfaktoren erklären. Insbesondere der letzte Punkt der unterschiedlichen Elektrifizierungsraten ist relevant. In den Stromszenarien sind die Wasserstoffverbräuche der LFS geringer als die der FfE trotz optimistischerer Baseline-Entwicklung. Wie in Kapitel 2.1 angesprochen, sind die Elektrifizierungsraten vermutlich ähnlich, insbesondere für die Niedertemperatur. Deshalb könnte der Unterschied daher kommen, dass der Biomasseverbrauch in den LFS abnimmt und durch Wasserstoff substituiert wird.

- Ampel auf **Gelb** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

Nicht erklären lässt sich, warum der Wasserstoffverbrauch in der WZ Gewinnung von Steinen und Erden und Sonstige Chemie in LFS O45 Strom größer ist als im Elektrifizierungsszenario der FfE.

- Ampel auf **Rot** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

2.4 Unterschiede in Wasserstoffverbräuchen in den Wasserstoffszenarien

Im Gegensatz zu den niedrigeren Wasserstoffverbräuchen in LFS O45 Strom (siehe Kapitel 2.3) sind die Wasserstoffverbräuche in den Wasserstoffszenarien der LFS gegenüber der FfE deutlich höher. Das ist dadurch verursacht, dass die LFS von einer wesentlich stärkeren Substitution fossiler EEV durch Wasserstoff statt Strom und Biomasse ausgehen.

Besonders ausgeprägt sind die relativen Unterschiede in den WZ mit überwiegend Niedertemperatur-Wärme (Ernährung und Tabak, Maschinenbau), da die FfE-Szenarien davon ausgehen, dass aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten überwiegend effiziente Wärmepumpen eingesetzt werden.

- Ampel auf **Gelb** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

3 Wirtschaftszweige mit überwiegend prozessspezifischem Verbrauch

Zu den energieintensiven Branchen mit prozessspezifischem Energieeinsatz zählen

- die Metallerzeugung,
- die Nichteisen(NE)-Metalle und -gießereien,
- die Grundstoffchemie,
- das Papiergewerbe,
- Glas und Keramik sowie
- die Verarbeitung von Steinen und Erden.

In diesen Wirtschaftszweigen wird die Höhe des EEV vor allem bestimmt durch

- Produktionsmengen (PM) und Annahmen zu inländischer Produktion bzw. Importen, [Vergleich der Produktionsmengen siehe Anhang]
- Prozessrouten und
- prozessspezifische EEV [siehe Anhang].

3.1 Grundstoffchemie

Die größten absoluten Unterschiede der einzelnen Energieträger zwischen LFS und FfE treten in der Grundstoffchemie auf. Während die FfE in beiden Szenarien von einer weitgehenden **Importstrategie für grünes Methanol** ausgeht, modellieren die LFS eine **inländische Methanolsynthese** für die Herstellung von Basischemikalien (z. B. für Methanol-to-Olefins- oder Methanol-to-Aromatics-Routen). Diese Annahme führt zu deutlich höheren **strom- und wasserstoffbezogenen EEV**, insbesondere im Wasserstoffszenario. Inwiefern die zusätzlichen EEV auf die High Value Chemicals Standorte und die in den LFS ausgeschlossenen Raffinerien aufgeteilt werden, geht aus der Dokumentation nicht hervor. Die Stromverbräuche der Stromszenarien sind trotz dieser unterschiedlichen Importannahmen ähnlich, weil im FfE-Elektrifizierungsszenario nur auf die deutlich stromintensivere Verfahrensrouten „Elektrocracker“ gesetzt wird. Diese gleicht den geringeren Stromverbrauch in der Methanolherstellung aus. Die LFS setzen selbst im Stromszenario auf die Methanol-to-X-Routen. Weitere Unterschiede entstehen durch:

- abweichende spezifische Prozessverbräuche, insbesondere der Elektrocracker,
 - andere Arten des chemischen Recyclings,
 - Einbezug des mechanischen Recyclings in den dadurch höheren LFS-PM,
 - Wegfall der inländischen Ammoniakproduktion im LFS O45-Strom und
 - (leicht) höhere PM in den Wasserstoffszenarien LFS gegenüber FfE.
- ➔ Ampel auf **Gelb** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

3.2 Metallerzeugung

In der Metallerzeugung erklären sich die höheren EEV der LFS nur teilweise durch höhere **PM** beim Primärstahl. Die prozessspezifischen Verbräuche sind gleich. 7 bis 16 TWh in den Strom- und Wasserstoffverbräuchen beider Szenarien ist **unklar**.

- ➔ Ampel auf **Rot** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

3.3 Glas und Keramik, Steine und Erden

In diesen Branchen entstehen die Unterschiede vor allem durch **Annahmen in den prozessspezifischen Verbräuchen und Brennstoffwechseln**. Höhere PM in der Glasindustrie bzw. niedrigere PM in der Zementklinkerherstellung erklären die Unterschiede nur teilweise. Während die FfE in den Szenarien von unterschiedlichen Stromanteilen bei Hybridwannen ausgeht², unterstellen die LFS einen stärkeren Einsatz der (rein) wasserstoffbefeuerten Schmelzwannen im Wasserstoffszenario. Generell sind die prozessspezifischen Verbräuche der Wannen in den LFS höher als im FfE-Modell. Im Wasserstoffszenario setzen die LFS auch in

² In Anlehnung an Leisin, Matthias; Radgen, Peter: Glas 2045 – Dekarbonisierung der Glasindustrie. IER, Universität Stuttgart, Studie im Auftrag des Bundesverband Glasindustrie e.V., Stuttgart, 2022.

der Zementklinkerherstellung stärker auf Wasserstoff als die FfE-Szenarien³ es tun.

- Ampel auf **Gelb** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

3.4 Nichteisen-Metalle, Papiergewerbe

Zu den WZ NE-Metalle und Papiergewerbe liegen nur PM in den LFS-Daten vor. Die höheren **PM** in den LFS erklären die höheren EEV in den beiden Szenarien im WZ **NE-Metalle** nur teilweise.

- Ampel auf **Rot** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

Die PM für **Papiergewerbe** sind in den LFS und FfE-Szenarien ähnlich. Da in diesem WZ über 90 % des Brennstoffbedarfs auf die Mitteltemperatur entfällt, könnten die LFS andere **Elektrifizierungsraten** haben. Das könnte zu dem höheren Stromverbrauch im LFS O45 Strom bzw. niedrigeren Verbrauch im LFS O45 H2 führen. Trotzdem ist in beiden Szenarien der Wasserstoffverbrauch höher als bei den FfE-Szenarien.

- Ampel auf **Rot** [Vergleich der Zieljahresverbräuche je WZ siehe Anhang]

³ In Anlehnung an Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020

4 Tabellarischer Anhang

Die Tabellen, die

- die Produktionsmengen in den vier Szenarien vergleichen

sind in der begleitenden Excel zu finden.

Die Tabellen, die

- die BWS und Energieintensität je prozessunspezifischen WZ
- Strom- und Erdgasverbräuche der Startjahre je prozessunspezifischen WZ
- Strom- und Wasserstoffverbräuche im Zieljahr je WZ

vergleichen und bewerten, sind in der begleitenden Abschlusspräsentation zu finden.

Prozess	Spezifischer Verbrauch pro Tonne Produkt nach LFS	Spezifischer Verbrauch pro Tonne Produkt nach FfE
Power-to-Ammonia	1,72 MWh _{el} (Strom) 7,00 MWh (H ₂ als Rohstoff)	2,32 MWh _{el} (Strom) 5,90 MWh (H ₂ als Rohstoff)
Power-to-Methanol	1,5 MWh _{el} (Strom) 6,31 MWh (H ₂ als Rohstoff)	0,28 MWh _{el} (Strom) 6,87 MWh (H ₂ als Rohstoff)
Elektrocracker	10,00 MWh _{el} (Strom) 30,56 (Naphtha als Rohstoff)	14,80 MWh _{el} (Strom) 49,70 (Naphtha als Rohstoff)
Methanol-to-Olefins	1,39 MWh _{el} (Strom) 12,64 MWh (Methanol als Rohstoff)	1,39 MWh _{el} (Strom) 15,81 MWh (Methanol als Rohstoff)
Methanol-to-Aromatics	1,39 MWh _{el} (Strom) 23,78 MWh (Methanol als Rohstoff)	1,39 MWh _{el} (Strom) 23,78 MWh (Methanol als Rohstoff)
Chemisches Kunststoffrecycling	Gasifizierung 3,89 MWh _{el} (Strom) 8,06 MWh (Kunststoff als Rohstoff)	Pyrolyse 5,23 MWh _{el} (Strom) 29,10 MWh (Kunststoff als Rohstoff)
Primärstahlherstellung durch Direktreduktion mit Wasserstoff	3,6 MWh(Gesamt)	3,6 MWh Gesamt davon 1,2 MWh H ₂ als Brennstoff, 0,6 MWh _{el} Strom, 1,8 H ₂ als Rohstoff
CCS bei Zement und Kalk	0,25 MWh(Gesamt)	0,31 MWh _{el} (Strom) 0,23 MWh (Brennstoff)
Elektrische Flachglasherstellung	2,78 MWh _{el} (Strom)	Keine elektrische Flachglasherstellung
H2-befeuerte Flachglaswanne	3,89 MWh _{el} (Strom)	Keine rein H ₂ -befeuerte Glasherstellung
Hybridwanne Flachglasherstellung	Keine Hybridwannen	2,41 MWh (Gesamt) davon 80% Strom im Elektrifizierungsszenario, 20% H ₂ Bzw. 60:40 im Wasserstoffsszenario

LFS Elektrocracker: van Delft, Y.; Kler, R. de (2017): Matching processes with electrification technologies. Final report of the E-match project. Hg. v. ECN.

LFS Rest: Bazzanella, Alexis Michael; Ausfelder, Florian (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Dechema. Frankfurt.

FfE: TransHyDE: Sammlung unveröffentlichter Datenblätter und Ergebnisse von Befragungen von Branchenverbänden aus den Jahren 2023 und 2024.

