

ERGEBNISSE DER AKTUALISIERTEN ENSURE-SZENARIEN 2022

Bericht zum Meilenstein 1.1.2
Reflexion über Storylines und Szenarien unter
Berücksichtigung neuerer wissenschaftlicher
Erkenntnisse und gesellschaftlichen
Einschätzungen

ENSURE
Neue EnergieNetzStruktURen für die Energiewende

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

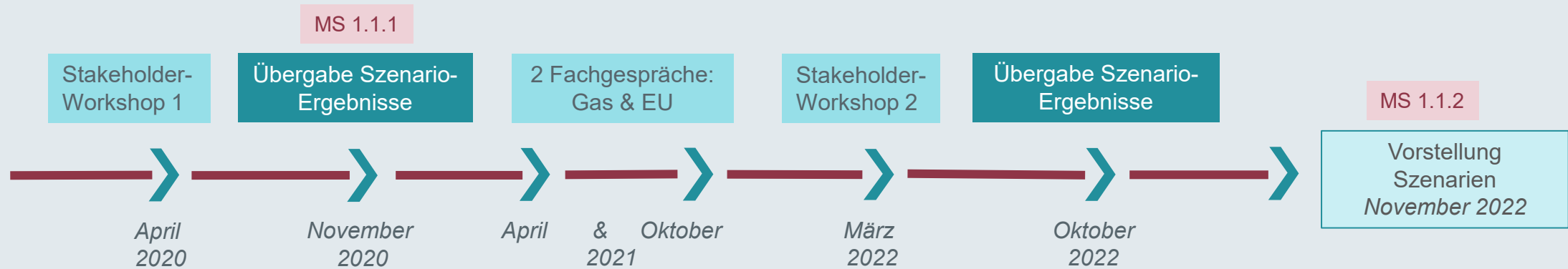
Hintergrund und Aufgabenstellung

- › Seit Beginn des ENSURE-Projekts werden eigene Szenarien entwickelt, die konsistente und gesellschaftlich akzeptabel erscheinende Entwicklungspfade für den weiteren Verlauf der Energiewende beschreiben. Durch vier verschiedenen angelegte Szenarien soll die Bandbreite der realistisch erscheinenden Entwicklungen aufgespannt und die treibenden Größen der Entwicklungen erkennbar gemacht werden.
- › In der ersten Projektphase wurden in enger Interaktion mit einer Gruppe externer Stakeholder vier Storylines bis zum Jahr 2030 entwickelt und vom Projektteam durch Einsatz geeigneter Modelle in energiewirtschaftliche Szenarien umgesetzt.
- › Die Storylines und Szenarien aus ENSURE 1 bilden die Basis und den Ausgangspunkt für die in ENSURE 2 erfolgte Aktualisierung und Fortschreibung über das Jahr 2030 hinaus. Dies erfolgte in zwei Durchgängen in den Jahren 2020 und 2022.
- › Die hiermit vorgelegten Ergebnisse der zweiten Aktualisierung basieren auf Festlegungen aus dem Frühjahr 2022 und beziehen die gesellschaftliche Diskussion um die Klimaziele, die energiepolitischen Zielsetzungen der seit Herbst 2021 bestehenden Bundesregierung und die politischen Entwicklungen auf europäischer Ebene ein. Die Auswirkungen des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine wurden, soweit schon erkennbar, berücksichtigt.

GEFÖRDERT VOM



Aktualisierung der Storylines und Szenarien in ENSURE 2



- › **Zwei Aktualisierungsschleifen** zu den Storylines und Szenarien, jew. zu Ende 2020 und zu Ende 2022
 - › Aktualisierung der bestehenden Storylines bis **2030** und Fortschreibung der Storylines bis ins Jahr **2050/2045**
 - › Entsprechende Anpassung und Weiterführung der Szenarien-Rechnungen
- › **Definition weniger zentraler Deskriptoren als charakterisierende Eigenschaften der Storylines** durch die Stakeholder, durch Projektteam nur in begründeten Fällen abgeändert und übersetzt in Szenarien
- › Zusätzlich vertiefende Betrachtung der **Rolle des Energieträgers Gas** für die Storylines und Szenarien sowie deren **europäischer Einbettung** (zwei Fachgespräche in 2021)

Ausrichtung der aktualisierten Storylines 2022

- › Die grundsätzliche Ausrichtung der vier Szenarien bleibt unverändert:
 - › Szenario A beschreibt eine schwache Klimapolitik, die hinter den aktuellen Zielen zurückbleibt. Aufgrund mangelnder Akzeptabilität gelingt u.a. der Ausbau von EE-Strom weniger als erwartet.
 - › Szenario B stellt einen sehr ambitionierten Klimapfad dar, der über die aktuellen Ziele deutlich hinausgeht und in dem erneuerbarer Strom eine große Bedeutung gewinnt.
 - › In den Szenarien C und D werden die aktuellen Klimaziele erreicht, wobei das Szenario C eine starke europäische Kooperation (und auch vermehrte Importe u.a. von Wasserstoff) beschreibt, während in Szenario D die Energiewende stärker dezentral ausgeprägt wird.
- › Als neue, die Szenarien mit treibende Größe wird die Verfügbarkeit (und das Preisniveau) von Erdgas als Energieträger berücksichtigt. In Szenario C ist Erdgas relativ gut verfügbar, während in den Szenarien A und D Gas im Vergleich zur Nachfrage eher knapp ist.
- › Der Kohleausstieg erfolgt in Szenario B bis 2030, in den Szenarien C und D möglichst bis 2030, sofern die Stromversorgung gesichert werden kann, und in Szenario A bis 2038.
- › Weitere Parameter der Szenarien wurden passend zu den Treibern festgelegt.

GEFÖRDERT VOM



Ausrichtung der aktualisierten Storylines 2022

	Szenario A Schwache Klimapolitik	Szenario B Hohe Klima-Ambition	Szenario C Europäische Integration	Szenario D Dezentrale Energiewende
Klimaschutz-Ambition DE (KoaV = Koalitionsvertrag 2021)	Ziele des KoaV werden verfehlt	Pro-Kopf-Budget DE für 1,5 Grad (50% IPCC)	Ziele des KoaV werden erreicht	Ziele des KoaV werden erreicht
Klimaschutz-Ambition EU (EGD = European Green Deal)	EU-Länder verfehlen Ziele des EGD	Pro-Kopf-Budget EU für 1,5 Grad (50% IPCC)		
Verfügbare Menge an Erdgas (neu)	gering	(Bedarf ohnehin gering)	Mittel bis hoch	gering
Nutzenergiebedarf (NEB) / Suffizienz	NEB relativ hoch	NEB relativ niedrig	NEB zwischen A und B	NEB zwischen A und B
Einsatz von Wasserstoff/-derivaten	moderat	nach Bedarf / moderat	(sehr) hoch	moderat
Einsatz von Strom		starke Elektrifizierung	moderat	starke Elektrifizierung
Einsatz von Biomasse	hoch	moderat	sehr hoch (mit Importen)	gering
Kohleausstieg	bis 2038	bis 2030	bis 2030 (wenn möglich)	bis 2030 (wenn möglich)
Ausbau Wind Onshore	eher schwach	sehr stark	stark	sehr stark
Ausbau Wind offshore	moderat	sehr stark	(sehr) stark	eher schwach
PV-Ausbau	moderat, v.a. Aufdach	sehr stark	stark, Fokus Freifläche?	sehr stark, Fokus Aufdach
Akzeptabilität der Energiewende	eher niedrig			
Dezentralität			eher gering	sehr hoch

GEFÖRDERT VOM

Modellierung der Endverbrauchssektoren

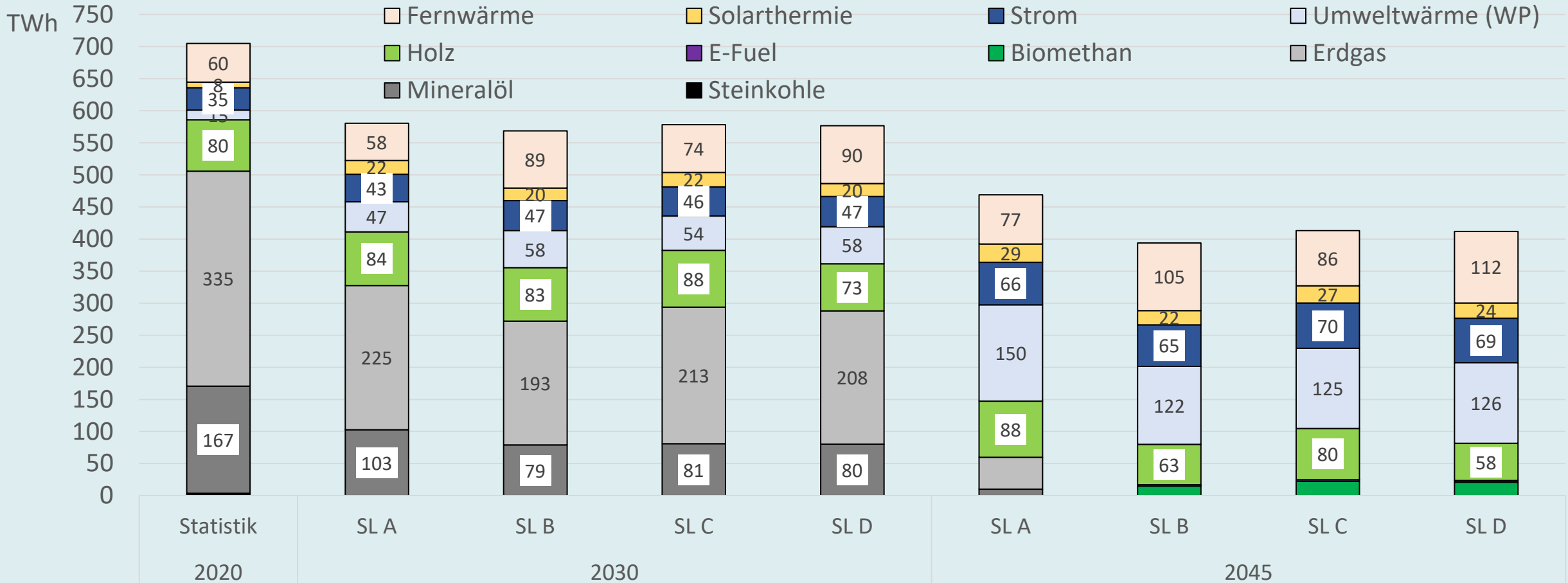


Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Deutschland: Ergebnisse der Gebäudesimulation mit dem Modell „Building Star“

- › Die Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser nimmt von 2020 bis 2045 um 33 % in Szenario A (d.h. -1,3 %/a) bis 44 % in Szenario B (d.h. -1,8 %/a) ab.
- › Erdgas und Heizöl werden durch Wärmepumpen, Biomasse, Fernwärme und Solarthermie ersetzt.
- › Die erforderliche Sanierungsrate beträgt etwa 2 %/a.
- › In Szenario B sind auch Suffizienzmaßnahmen berücksichtigt, z.B. die Absenkung der Raumtemperatur auf 19°C oder die Verringerung der Wohnfläche pro Kopf.

In den nachfolgenden Grafiken steht „SL A“ bis „SL D“ für die Szenarien, die auf den Storylines A bis D basieren.

Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Deutschland: Ergebnisse der Gebäudesimulation mit dem Modell „Building Star“

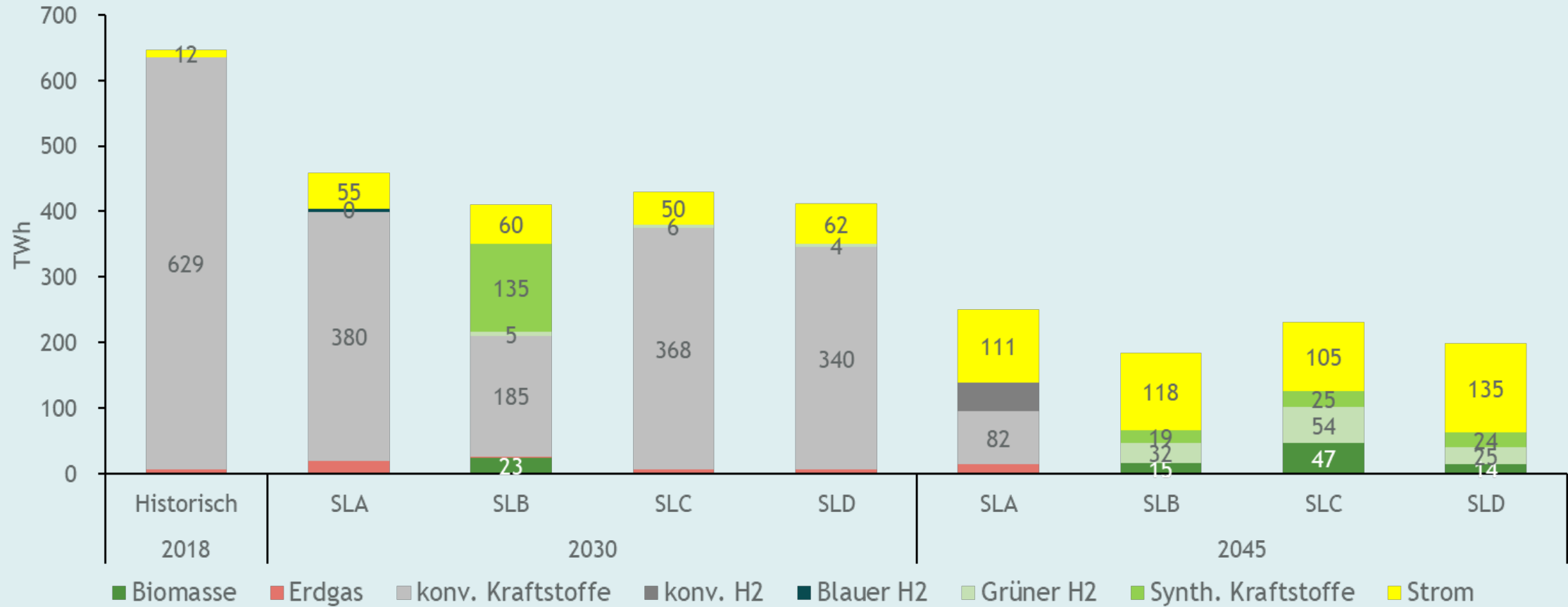


GEFÖRDERT VOM

Endenergieverbrauch im Verkehrssektor: Ergebnisse der Investitionsmodellierung

- › Der deutsche Verkehrssektor weist in allen betrachteten Szenarien eine hohe Elektrifizierung bis 2045 auf.
- › Der erhöhte Strombedarf wird vor allem durch den Hochlauf von Elektroautos getrieben.
- › Aufgrund der vergleichsweise hohen Effizienz des Elektromotors wird der Endenergiebedarf im Verkehrssektor durch den Einsatz von Elektroautos stark reduziert.
- › Damit die sehr ambitionierten Klimaziele in Szenario B erreicht werden können, müssen synthetische Kraftstoffe bereits im Jahr 2030 eingesetzt werden.
- › Im Jahr 2045 wird der höchste Elektrifizierungsgrad in Szenario D erreicht, während in der Szenario C mehr synthetische Brennstoffe für die Dekarbonisierung des Verkehrssektor eingesetzt werden.

Endenergieverbrauch im Verkehrssektor: Ergebnisse der Investitionsmodellierung



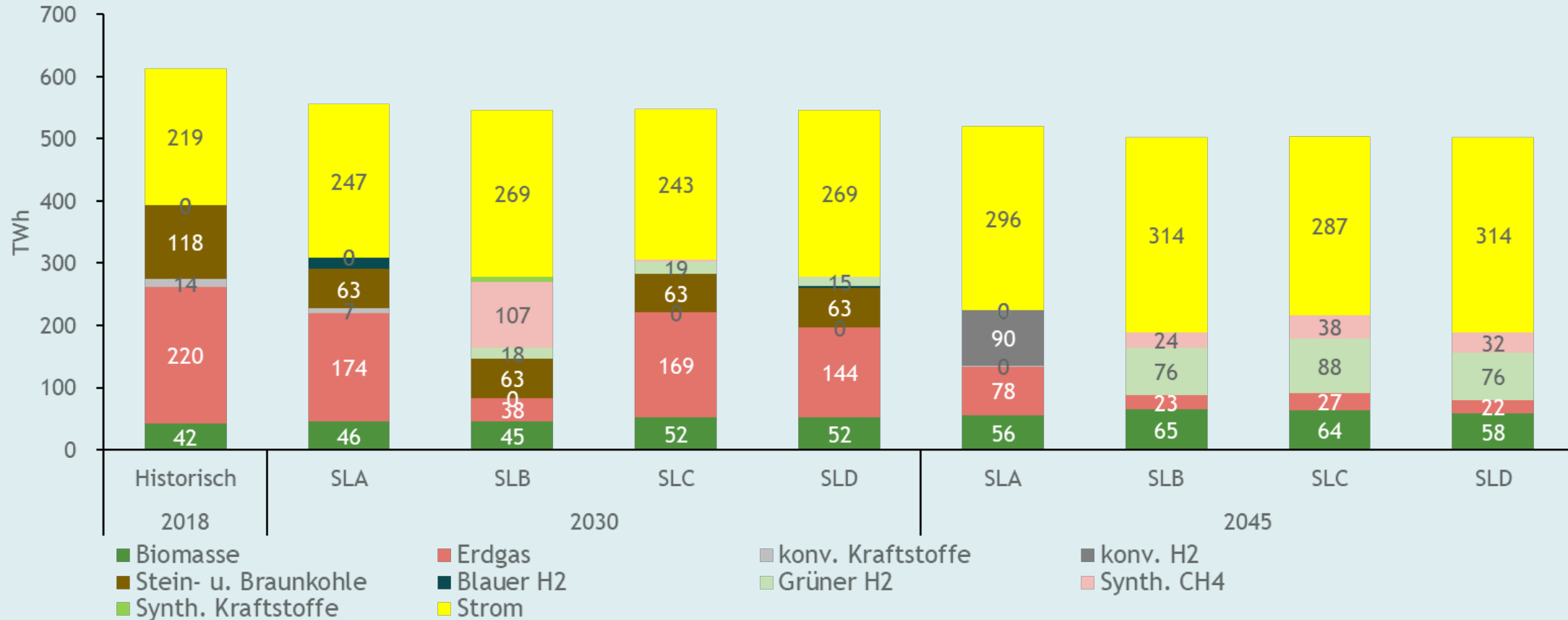
Endenergieverbrauch im Industriesektor: Ergebnisse der Investitionsmodellierung

- › Ähnlich zum Verkehrssektor unterzieht sich auch der Industriesektor einer signifikanten Elektrifizierung, um die in den Storylines formulierten Klimaziele zu erreichen.
- › Der Anteil an Strom im Endenergieverbrauch steigt von ca. 35 % im Jahr 2018 auf 43 % in 2030 und 53 % in 2045 (im Durchschnitt über alle Szenarien).
- › Der Einsatz von Stein- und Braunkohle geht bis 2030 in allen Szenarien um 53 % zurück. Im Jahr 2045 wird in keinem der Szenarien mehr Kohle eingesetzt.
- › Die Nutzung von synthetischem Methan in 2030 in Szenario B ist auf die sehr hohe angenommene Klimaambition zurückzuführen.
- › Nicht erneuerbarer Wasserstoff kommt ausschließlich in Szenario A in 2045 zum Einsatz. In den anderen Szenarien wird grüner Wasserstoff als Ersatz für Gas eingesetzt, um Emissionen in der Industrie einzusparen und Klimaziele zu erreichen.

GEFÖRDERT VOM



Endenergieverbrauch im Industriesektor: Ergebnisse der Investitionsmodellierung



Europäische Investitionsmodellierung mit dem Modell DIMENSION

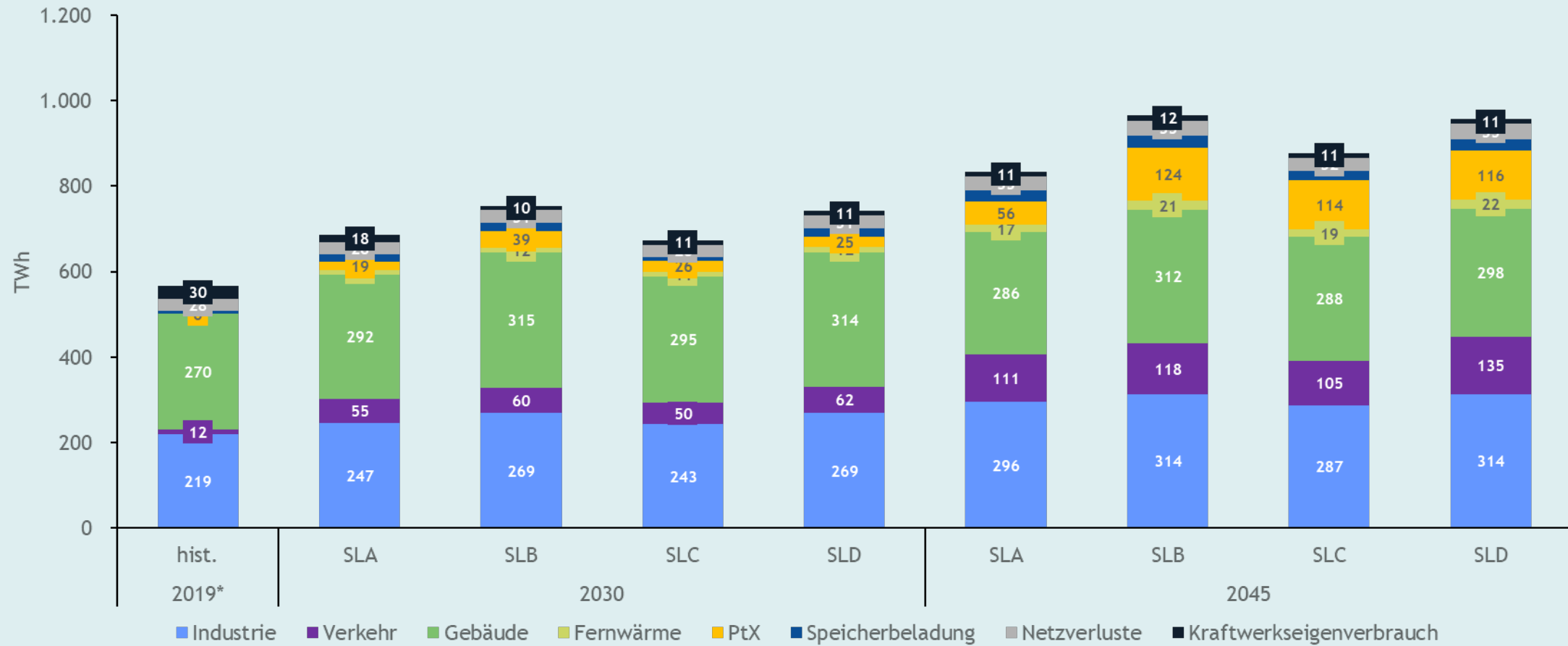
Stromverbrauch

- › Die untersuchten Szenarien zeigen einen steigenden Trend für den deutschen Stromverbrauch bis zum Jahr 2045. Dies folgt aus der Elektrifizierung der Endverbrauchssektoren sowie aus dem Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft.
- › Der höchste Anstieg des gesamten Stromverbrauchs lässt sich in Szenario B beobachten (um 30 % bis 2030 sowie um 67 % bis 2045, jeweils zum Startjahr 2019). In 2045 trägt insbesondere die hohe Stromnachfrage für PtX-Erzeugung zum Anstieg bei.
- › In Szenario C steigt der Stromverbrauch bis 2030 am geringsten an (um 17 %). Ursächlich hierfür ist der in diesem Szenario angenommene Fokus auf Wasserstoff.
- › In 2045 liegt der deutsche Bruttostromverbrauch zwischen 833 TWh (Szenario A) und 966 TWh (Szenario B).

GEFÖRDERT VOM



Stromverbrauch



THG-Emissionen

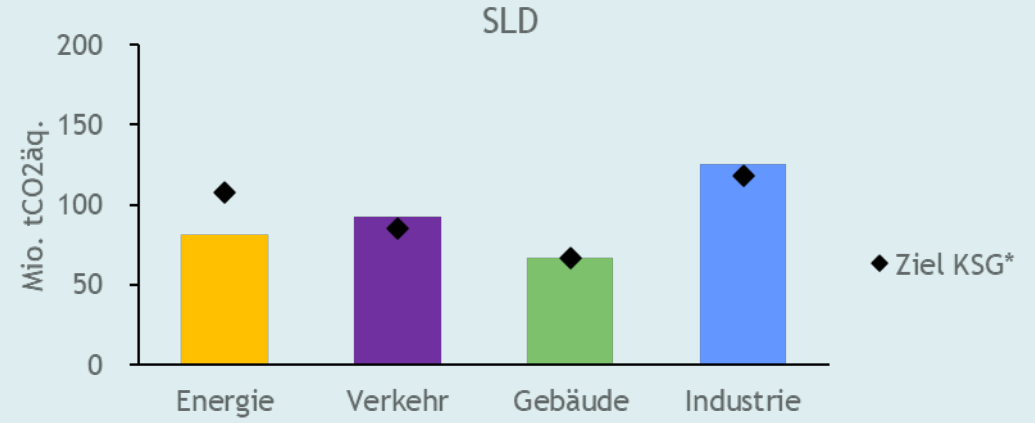
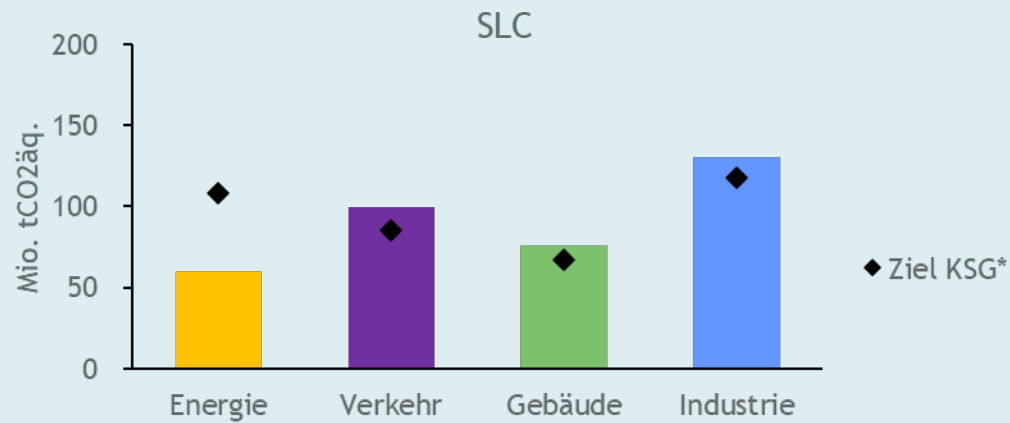
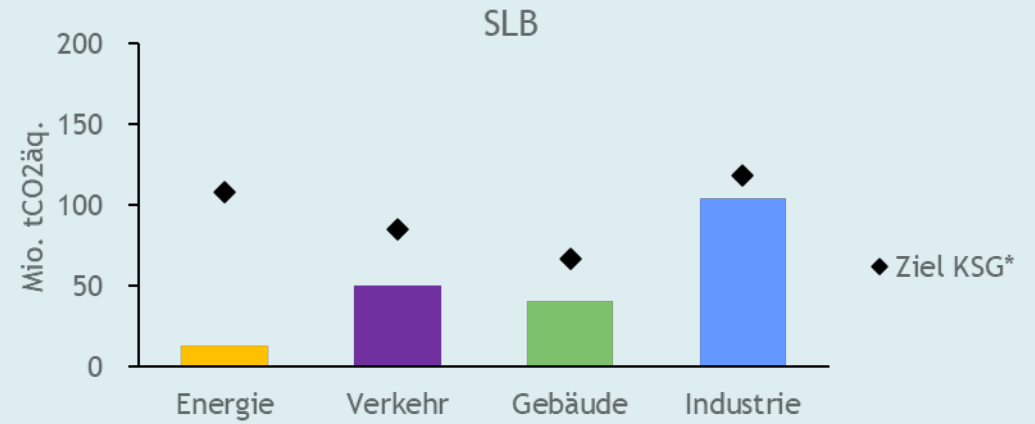
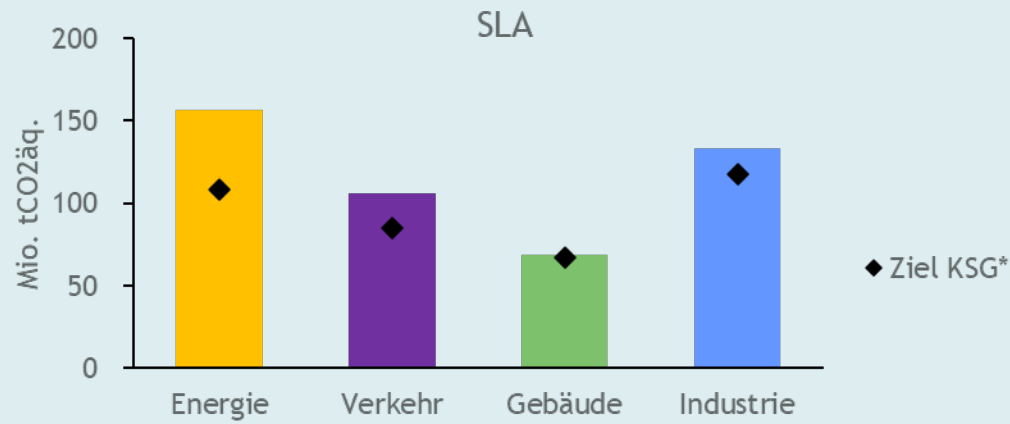
- › In 2030 variieren die THG-Emissionspfade* zwischen den analysierten Szenarien:
 - › Alle sektoralen Emissionsziele werden im Jahr 2030 ausschließlich in Szenario B erreicht.
 - › Im Gegensatz dazu werden in Szenario A alle sektoralen Emissionsziele verfehlt.
 - › Die Szenarien C und D zeigen eine ähnliche Entwicklung der sektoralen THG-Emissionen. Der Energiesektor überkompensiert die Emissionsminderung für die Endverbrauchssektoren, um die Klimaziele kostenoptimal erreichen. Dies geschieht aufgrund der vergleichsweise niedrigeren Vermeidungskosten im Energiesektor im Vergleich zu den Endverbrauchssektoren.
- › Im Jahr 2045 werden in den Szenarien B, C und D aufgrund der gleichen, ambitionierten Klimaziele identische Emissionsmengen beobachtet. In der Storyline A wird das Ziel der Klimaneutralität verfehlt.
 - › Die unvermeidbaren industriellen Prozessemissionen werden durch technische Senken (wie beispielsweise CCS und DAC**) aufgefangen. Der Emissionen des LULUCF***-Sektors wurden für alle Storylines identisch zu –42 Mt.CO₂äq. im Jahr 2045 gewählt.

* Die sektoralen Klimaziele im Jahr 2030 werden in der Modellierung nicht vorgegeben. Stattdessen gilt ein nationales Emissionsbudget, sodass eine kostenoptimale Energiebereitstellung zwischen den Sektoren untersucht werden kann.

** Carbon capture and storage, direct air capture

*** Land use, land-use change, and forestry

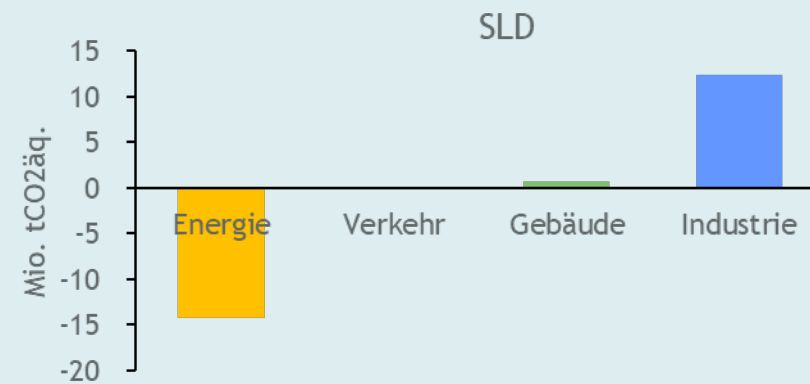
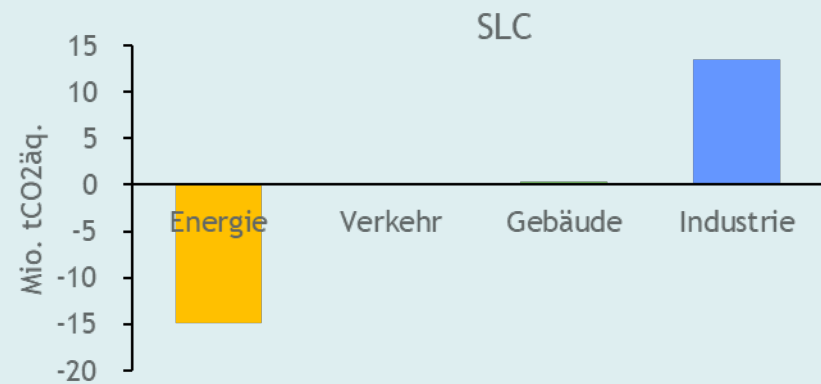
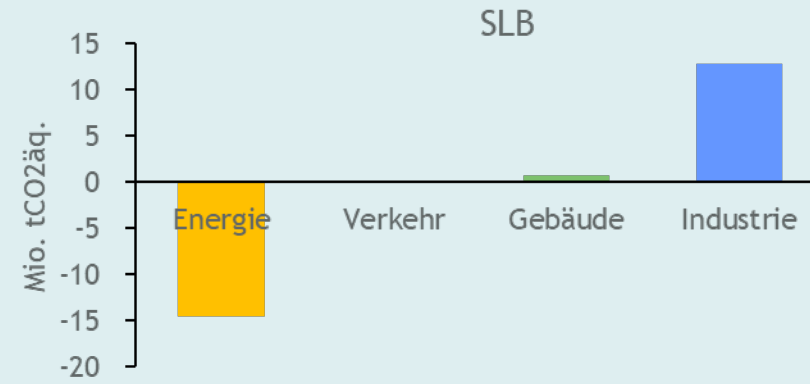
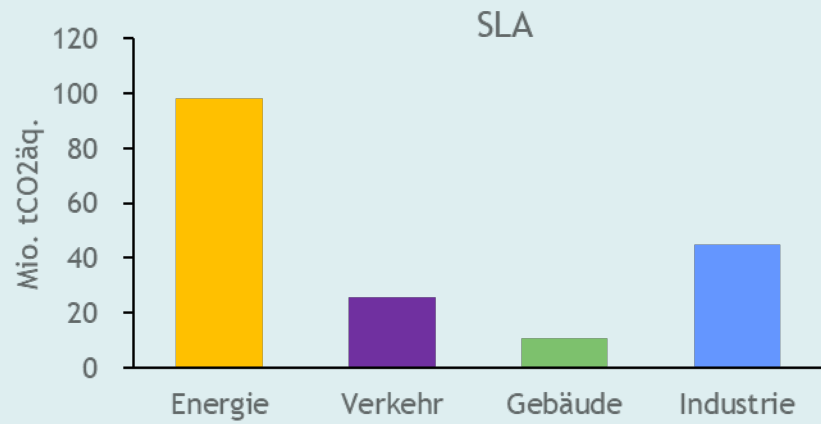
THG-Emissionen 2030



GEFÖRDERT VOM

* KSG: Klimaschutzgesetz

THG-Emissionen 2045



GEFÖRDERT VOM



Erneuerbare Kapazitäten

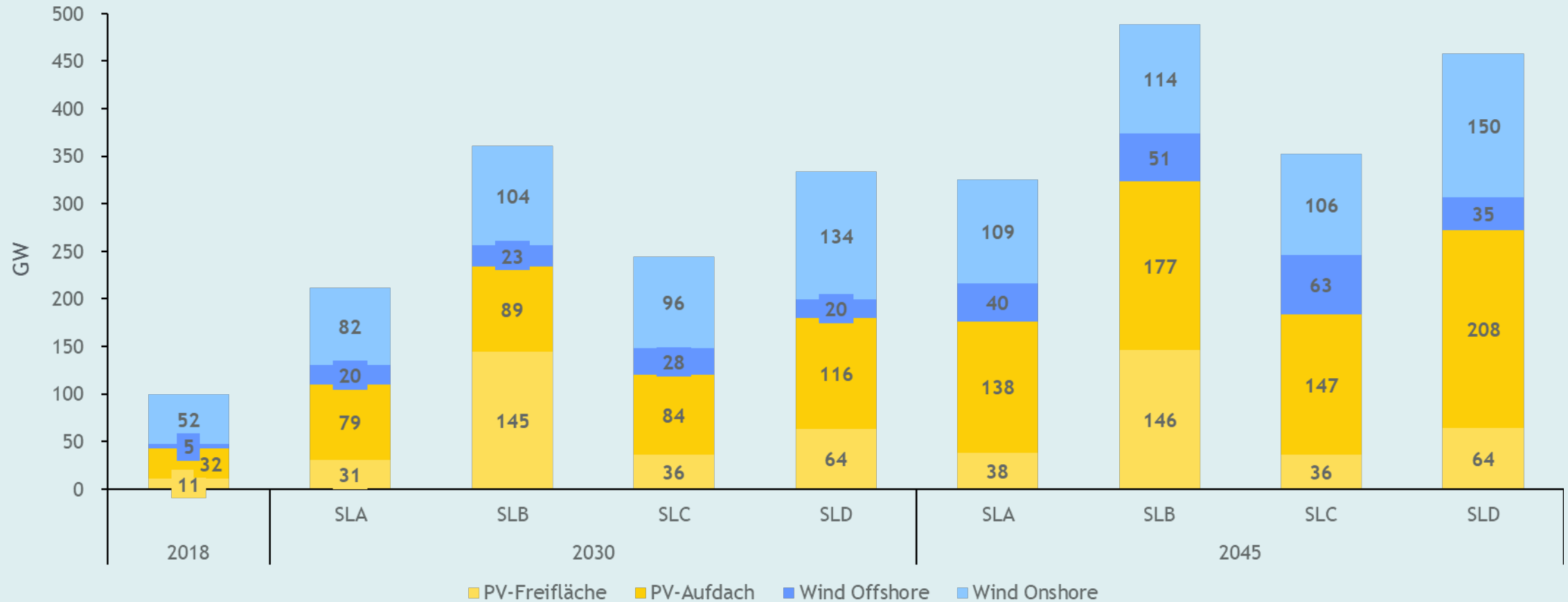
- › Aufgrund der hohen Klimaschutzambitionen kommt es in Szenario B zum stärksten Ausbau von EE-Kapazitäten sowohl bis 2030 als auch bis 2045.
- › Der hohe Ausbau von Wind-Offshore Kapazitäten in Szenario C erfolgt insbesondere durch die hohe Nachfrage nach Wasserstoff aus inländischen Elektrolyseuren in diesem Szenario. Szenario D zeigt hingegen den höchsten Ausbau von Wind-Onshore-Anlagen, die im Vergleich zu Wind-Offshore eine dezentralere Erzeugungstechnologie darstellen.
- › In den Szenarien B und D wird die Leistung im Energiesystem in 2045 von PV-Anlagen dominiert. Insbesondere Aufdachanlagen stellen einen Großteil der PV-Kapazitäten dar. In Kombination mit den hinterlegten PV-Heimspeicherkapazitäten können diese zu einer signifikanten Minderung des Netzstrombezugs von Haushaltskunden führen.*
- › Die Kapazitäten der PV-Freiflächenanlagen erreichen in den Szenarien B, C und D die politisch festgelegten Ziele bis 2030. Ein weiterer Ausbau zwischen 2030 und 2045 findet kaum statt. Angesichts des starken Ausbaus von PV-Aufdachanlagen scheint hier eine Sättigung der PV-Freiflächenanlagen bereits im Jahr 2030 erreicht zu sein.

* Der Betrieb von PV-Heimspeicheranlagen wurde in einer Vorab-Modellierung hinsichtlich einer Maximierung des Eigenverbrauchs von Haushaltskunden optimiert.

GEFÖRDERT VOM



Erneuerbare Kapazitäten



GEFÖRDERT VOM



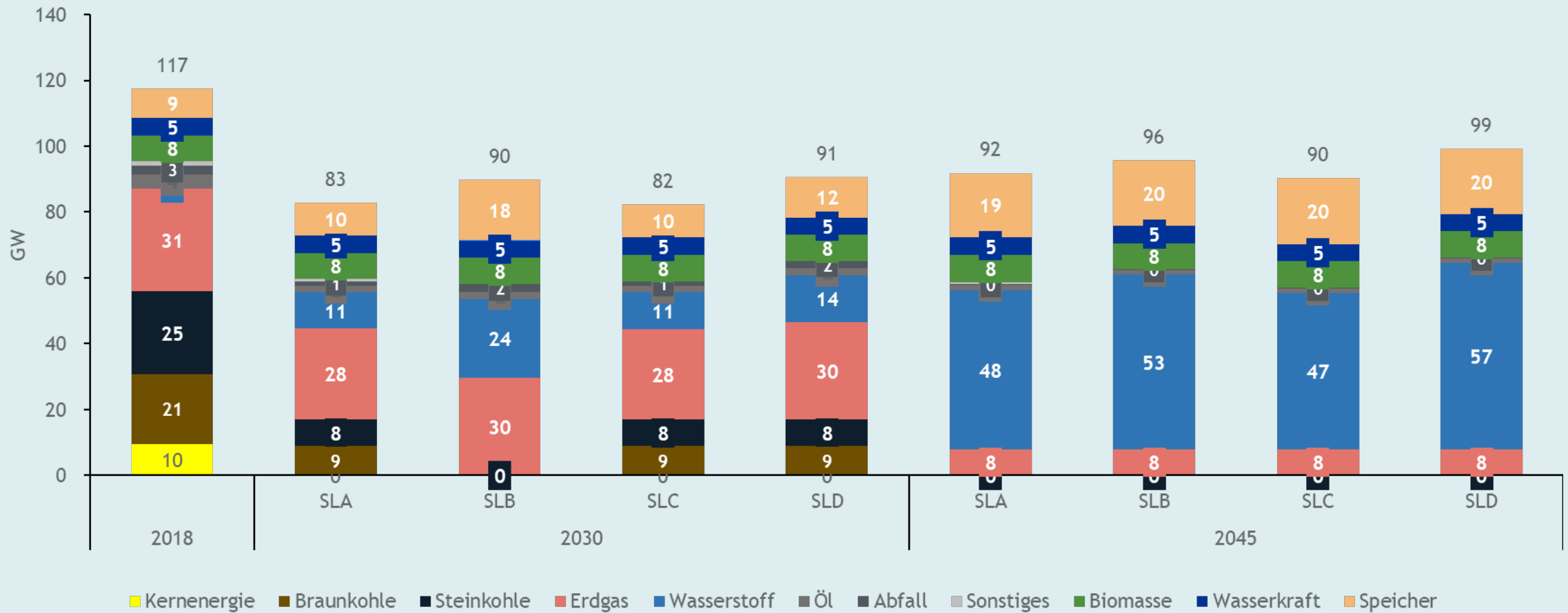
Steuerbare Kapazitäten

- › In Szenario B findet der Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 annahmegemäß statt. In den restlichen Szenarien werden die gesetzlich maximal zugelassenen Kohlekapazitäten vollständig genutzt. Eine marktgetriebene Stilllegung erfolgt demnach nicht.
- › Szenario B zeigt hohe Investitionen in wasserstofffähige Gaskraftwerke bereits im Jahr 2030. In den übrigen Szenarien werden sowohl bestehende Erdgaskraftwerke erneuert als auch wasserstofffähige Gaskraftwerke errichtet. Diese Investitionen sind in allen Szenarien zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit notwendig und kompensieren die Senkung der gesicherten Leistung durch den (partiellen) Ausstieg aus der Kohleenergie.
- › Im Jahr 2045 wird der Kraftwerkspark von wasserstofffähigen Kraftwerken bestimmt. Wasserkraft sowie biomassebetriebene Kraftwerke ergänzen den Kraftwerkspark. Darüber hinaus findet ein Ausbau von Großbatteriespeichern statt, welche gemeinsam mit Pumpspeicherkraftwerken in der Position "Speicher" enthalten sind. Diese enthält jedoch nicht die PV-Heimspeicher, da diese nicht direkt im Strommarkt partizipieren.

GEFÖRDERT VOM



Steuerbare Kapazitäten



Europäische Dispatchmodellierung mit dem Modell PowerFlex



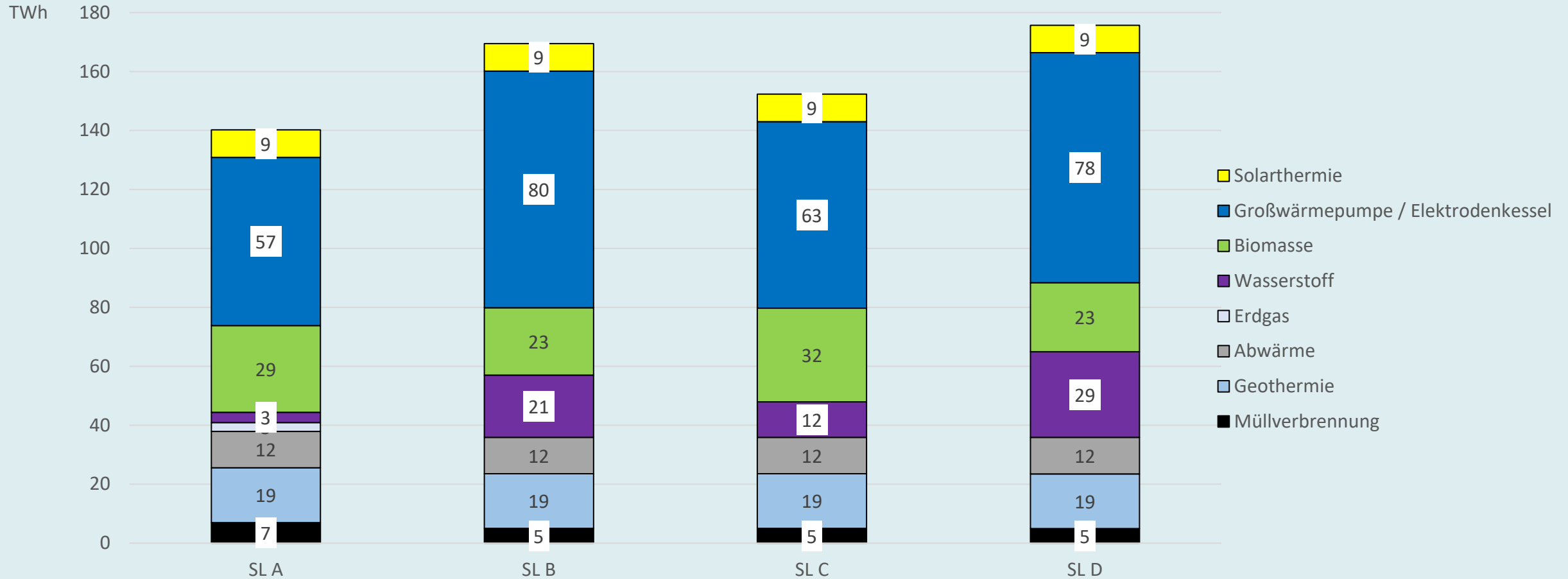
Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in Deutschland (Zieljahr 2045)

- › Der Energieträgermix der Nah- und Fernwärmeerzeugung setzt sich in den Szenarien wie folgt zusammen:
 - › Großwärmepumpen und Elektrodenkessel: 41% (SL A) bis 47% (SL B)
 - › Biomasse-KWK: 13% (SL B & D, geringes Biomasseangebot) bis 21% (SL A & C, hohes Biomasseangebot)
 - › Geothermie: 11% bis 13%
 - › Wasserstoff-KWK: 2% (SL A sowie zusätzlich auch 2% Erdgas-KWK) bis 17% (SL D)
 - › Abwärme: 7% bis 9%
 - › Solarthermie: 5% bis 7%
 - › Müllverbrennung: 3% bis 5%
- › In der Modellierung werden Netzverluste in Höhe von 10% sowie ein saisonaler Wärmespeicher unterstellt.

GEFÖRDERT VOM



Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in Deutschland (Zieljahr 2045)



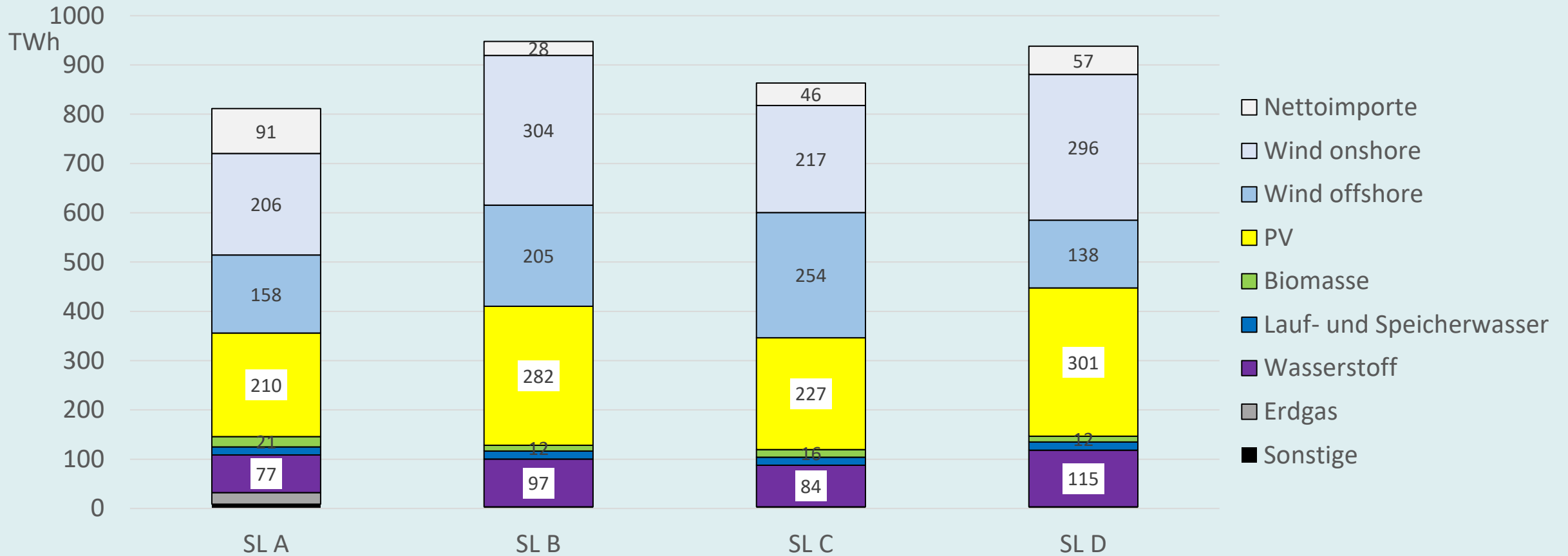
Energieträgermix zur Stromerzeugung in Deutschland (Zieljahr 2045)

- › Der Energieträgermix der Stromerzeugung besteht in den klimaneutralen Zielszenarien im Wesentlichen aus den Energieträgern Wind-Onshore, Wind offshore, PV und Wasserstoff.
- › Die Szenarien C und D bilden ein gegensätzliches Paar:
 - › Szenario C: Viel Wind-Offshore, dafür weniger Wind-Onshore und PV
 - › Szenario D: Viel Wind-Onshore und PV, dafür weniger Wind-Offshore
- › Biomasse und Wasserkraft bilden nur noch einen geringen Anteil von zusammen 3% bis 5%.
- › Deutschland ist in allen vier Storylines ein Nettostromimporteuer.
- › Wasserstoff wird als teure Erzeugungstechnologie eingesetzt, wenn die verfügbaren Flexibilitätsoptionen nicht ausreichen, um ein Kapazitätsdefizit auszugleichen.

GEFÖRDERT VOM



Energieträgermix zur Stromerzeugung in Deutschland (Zieljahr 2045)



Europaweiter Einsatz von Kraftwerken und Flexibilitätsoptionen

Flexibilitätsoption	Deutschland	Andere Länder
Stromtausch mit den Nachbarländern	NTC	NTC
Kurzfristspeicher (Tagesspeicher)	<ul style="list-style-type: none"> • PSW & Großbatterien • DSM: Industrie und WP • Elektromobilität (smart charging) • Elektrische Fernwärmeerzeugung 	<ul style="list-style-type: none"> • PSW & Großbatterien • DSM: Industrie
Langfristspeicher	<ul style="list-style-type: none"> • DSM: Elektrolyseure • H2-Kraftwerke 	<ul style="list-style-type: none"> • DSM: Elektrolyseure • H2-Kraftwerke
Eigenverbrauchsmaximierung	<ul style="list-style-type: none"> • PV-Batterie Heimspeicher 	

NTC: Net Transfer Capacity; PSW: Pumpspeicherwerke; DSM: Demand Side Management

GEFÖRDERT VOM

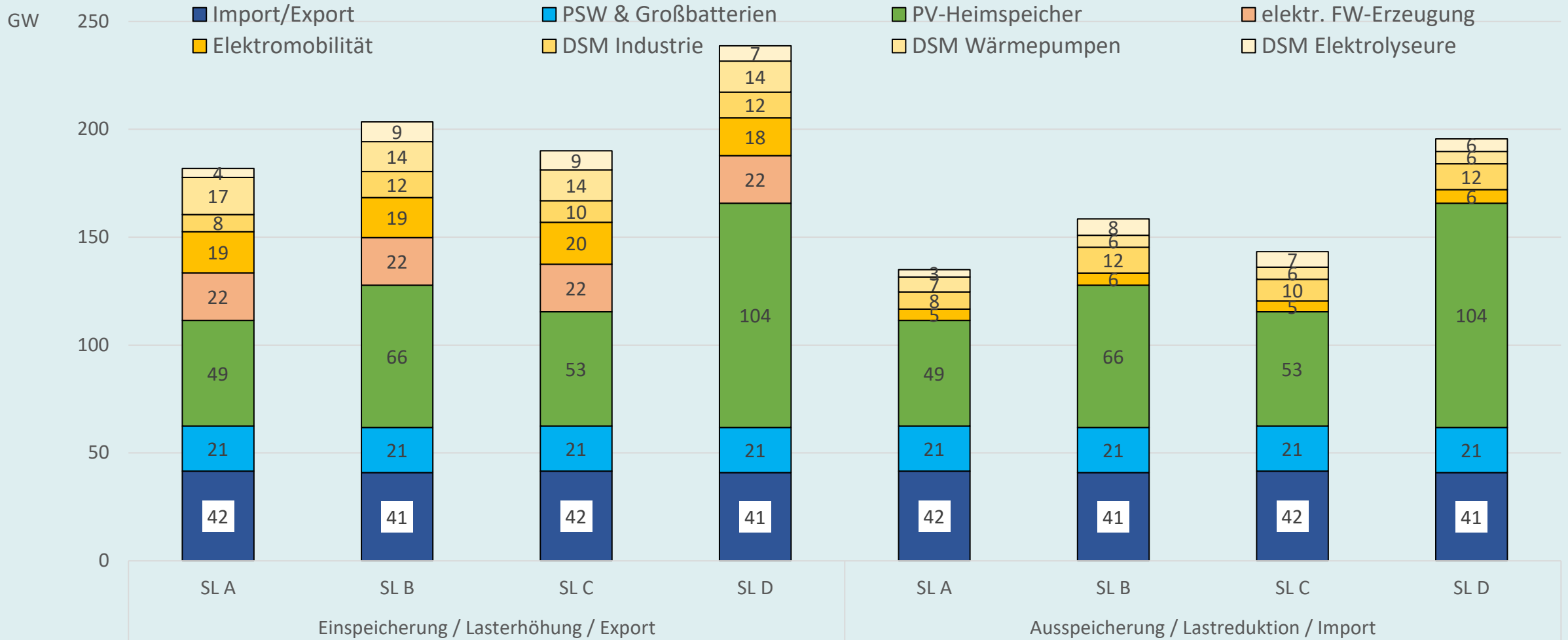
Verfügbare Leistung und Einsatz von Flexibilitätsoptionen in Deutschland (Zieljahr 2045)

- › **PV-Batteriespeicher** stellen die Flexibilitätsoption mit der höchsten installierten Leistung dar. Die höchste installierte Leistung hat Storyline D (wegen Fokus auf Dezentralität). Sie werden aufgrund der Eigenverbrauchs-Maximierung und der geringen Speicherkapazität jedoch im Vergleich zu den anderen Flexibilitätsoptionen nur wenig eingesetzt (etwa 350 Vollbenutzungsstunden).
- › **Importe und Exporte** stellen die Flexibilitätsoption mit der zweithöchsten installierten Leistung und mit den höchsten Strommengen dar. Daraus folgen auch hohe Vollbenutzungsstunden (etwa 2.500 Vollbenutzungsstunden für Stromexporte und 4.000 Vollbenutzungsstunden für Stromimporte).
- › Bei **Elektromobilität** (smart charging) und bei **DSM** ist die verfügbare Flexibilität einerseits profilabhängig und andererseits häufig asymmetrisch geprägt. Im Jahresdurchschnitt steht mehr Leistung zur Lasterhöhung zur Verfügung als zur Lastreduktion.
- › Die **elektrische Fernwärmeerzeugung** ist eine von insgesamt acht Technologien / Optionen zur Fernwärmeerzeugung. Sie stellt eine Flexibilitätsoption zur Lasterhöhung bei niedrigen Strompreisen dar. In Stunden mit hohen Strompreisen kommen dann KWK-Anlagen zum Einsatz.

GEFÖRDERT VOM

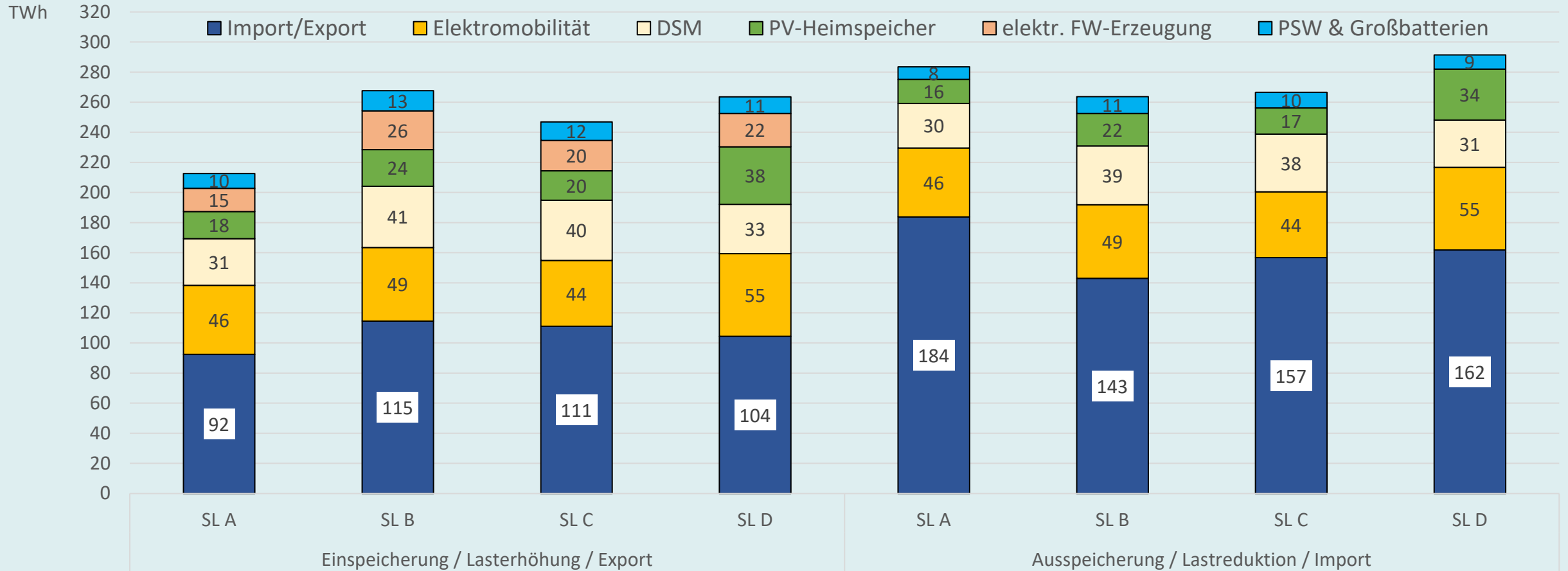


Verfügbare Leistung von Flexibilitätsoptionen in Deutschland (2045)



GEFÖRDERT VOM

Einsatz von Flexibilitätsoptionen in Deutschland (Zieljahr 2045)



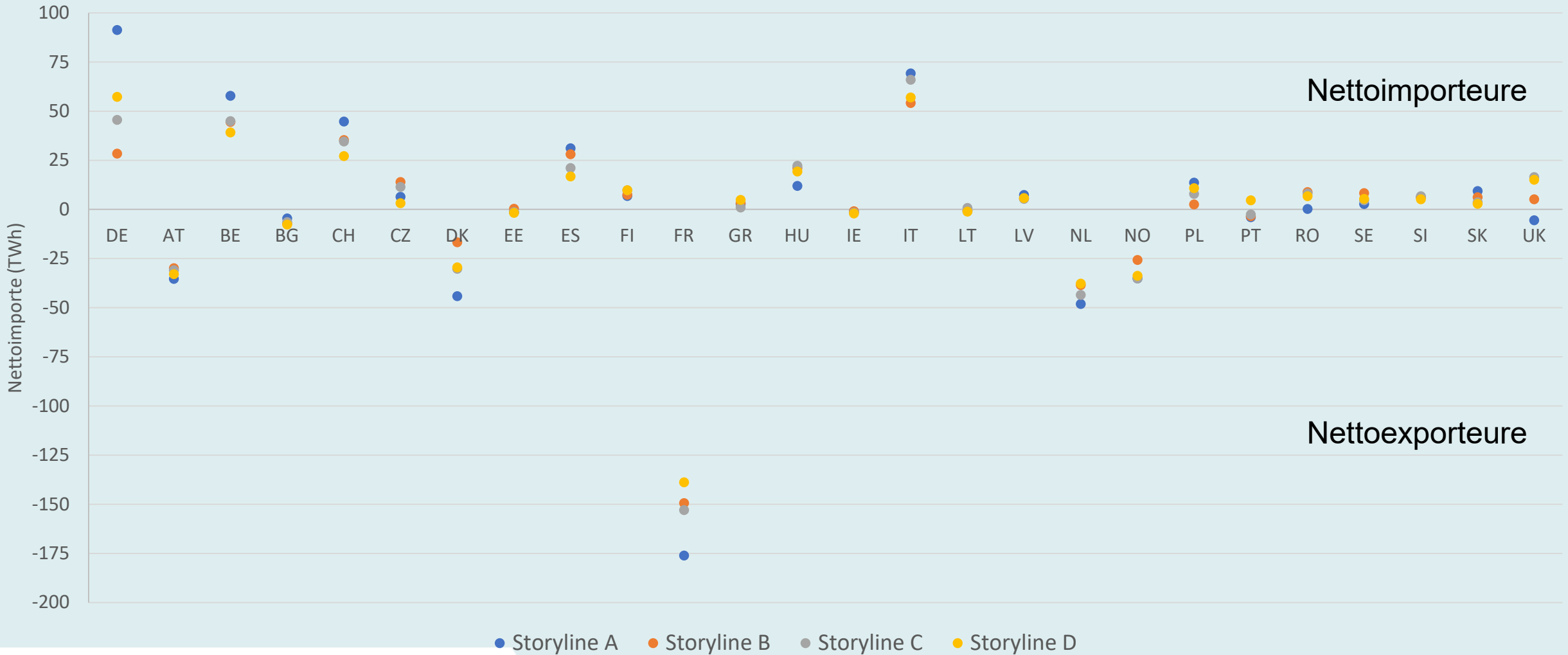
Kennzahlen im europäischen Vergleich

- › **Nettoimporte:** DE, IT, BE, CH und ES sind die 5 größten Nettostromimporteure; FR, DK, NL, NO und AT sind die 5 größten Nettostromexporteure. Bei FR sind die hohen Stromexporte nicht nur auf Kernenergie zurückzuführen, sondern auch auf eine hohe Stromerzeugung bei Wind-Onshore und Offshore sowie die gute Vernetzung im europäischen Stromverbund
- › Neben Deutschland zeigt Frankreich deshalb auch hohe **Transitflüsse**. UK fungiert teilweise auch als Transitland, da es in 2045 über Seekabel mit vielen europäischen Ländern verbunden ist.
- › Die **Volllaststunden für Wasserstoffkraftwerke** liegen zwischen 500 und 3.000 h/a. Nettoimportländer weisen tendenziell höhere Volllaststunden auf, Nettoexportländer tendenziell geringere Volllaststunden.
- › Die **Volllaststunden für Kernkraftwerke** liegen in der Größenordnung von 6.000 bis 7.000 h/a.
- › Die **Volllaststunden für Pumpspeicherwerke (PSW) & Großbatterien** belaufen sich auf durchschnittlich 550 h/a.
- › Die Volllaststunden für **Importe** sind bei Nettoimportländern hoch und bei Nettoexportländern niedrig.
- › Die Volllaststunden für **Exporte** sind bei Nettoexportländern hoch und bei Nettoimportländern niedrig.

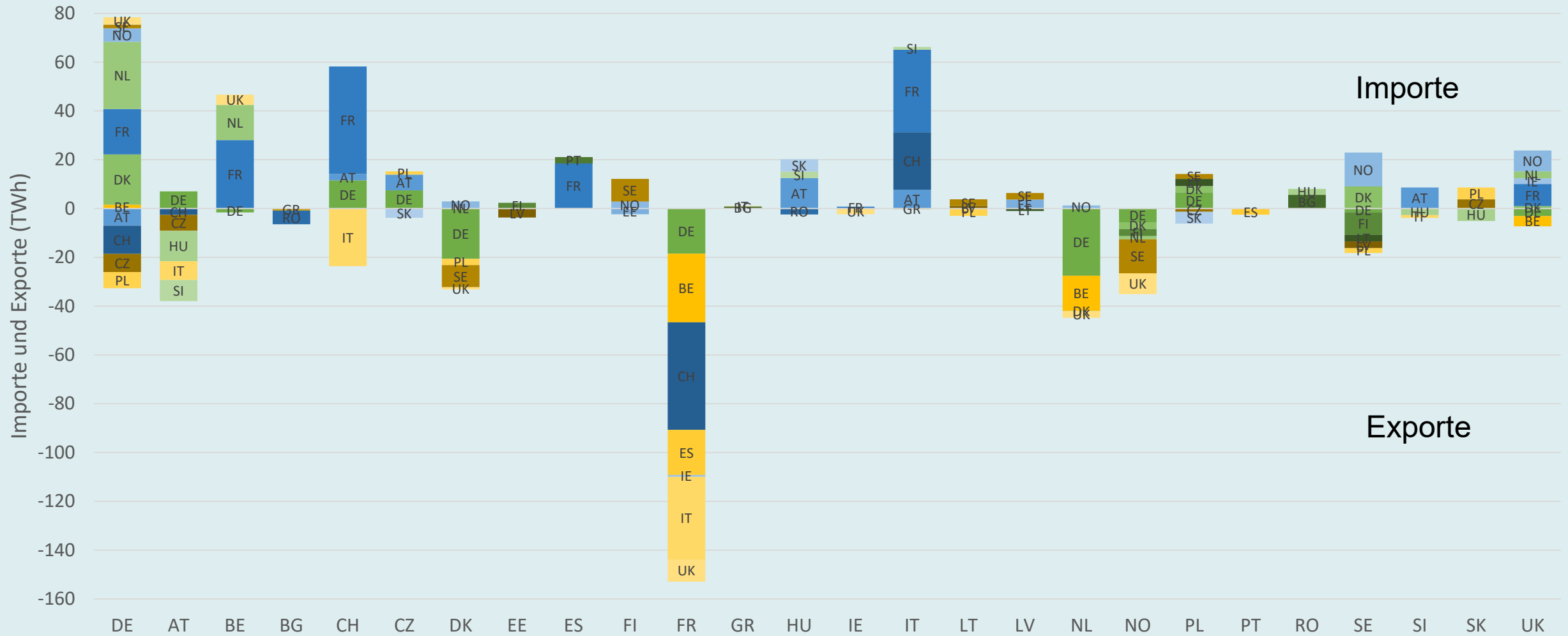
GEFÖRDERT VOM



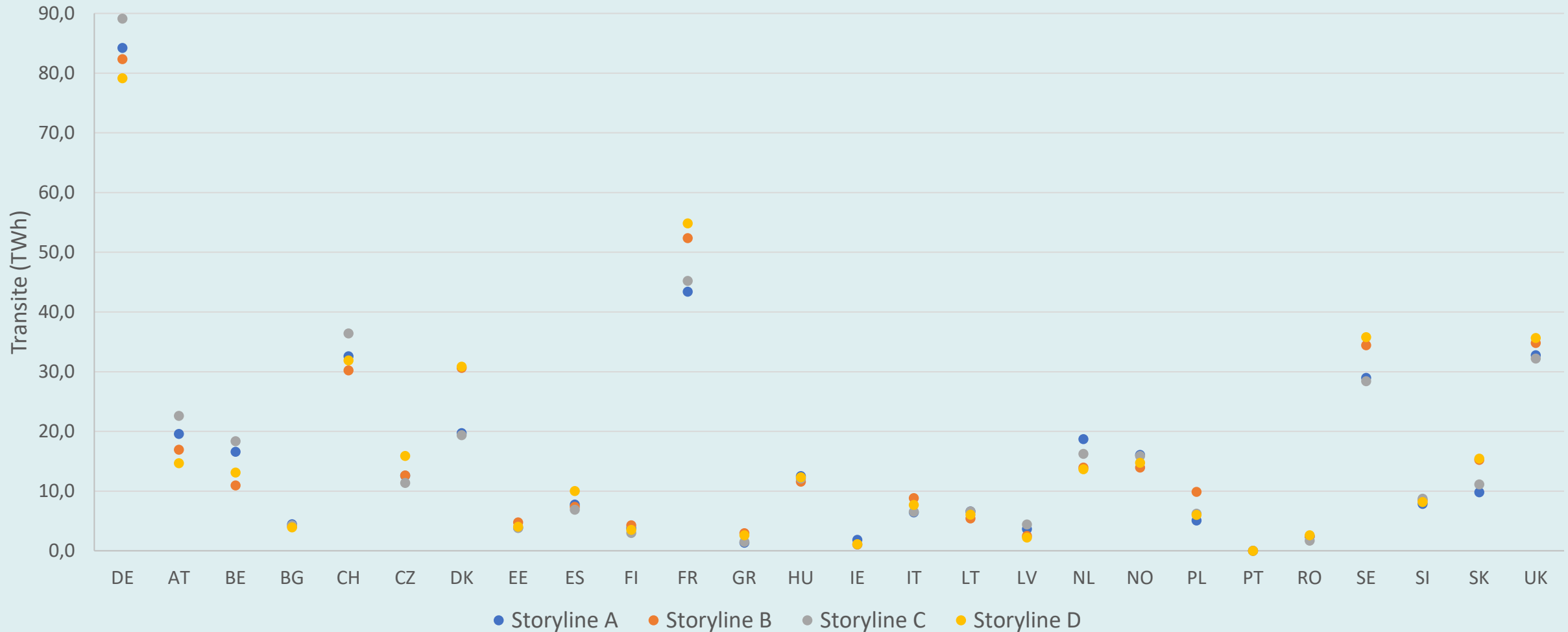
Nettoimporte (Zieljahr 2045)



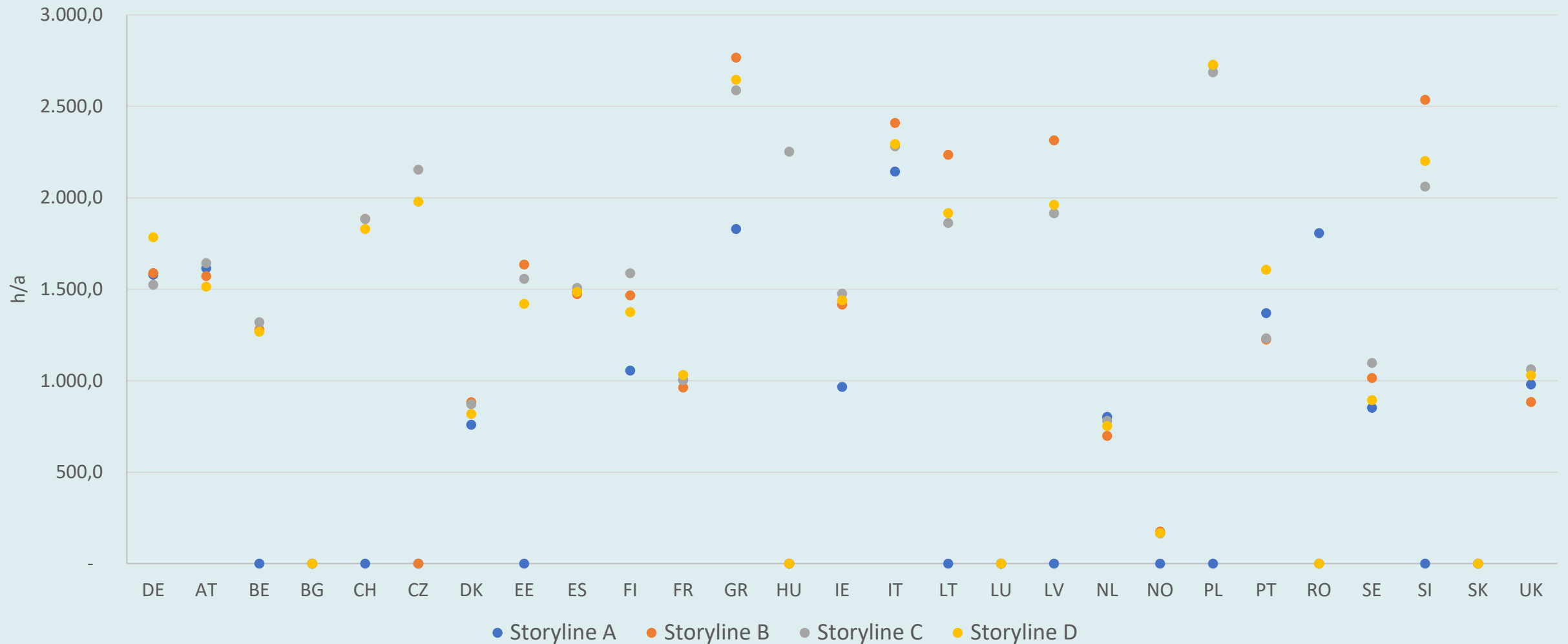
Importe & Exporte (Szenario C, 2045)



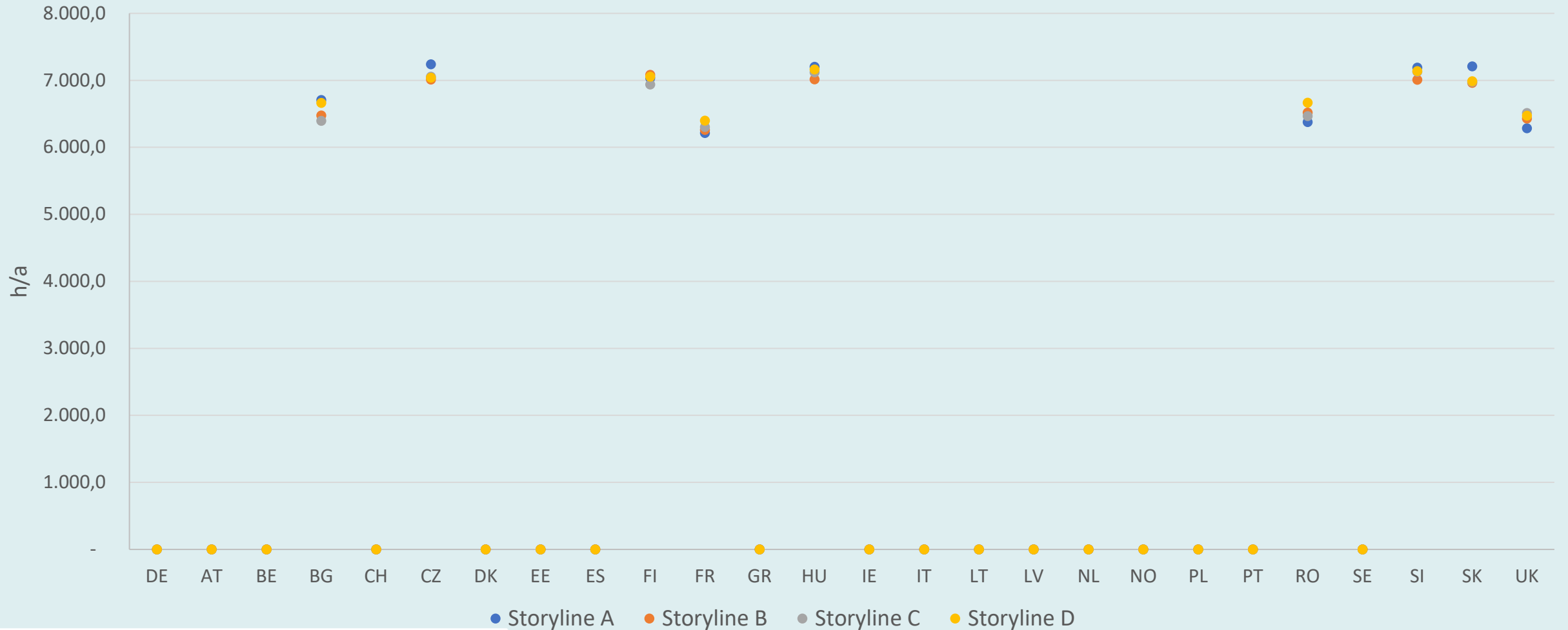
Jährliche Transitflüsse (2045)



Volllaststunden Wasserstoff-Kraftwerke (2045)



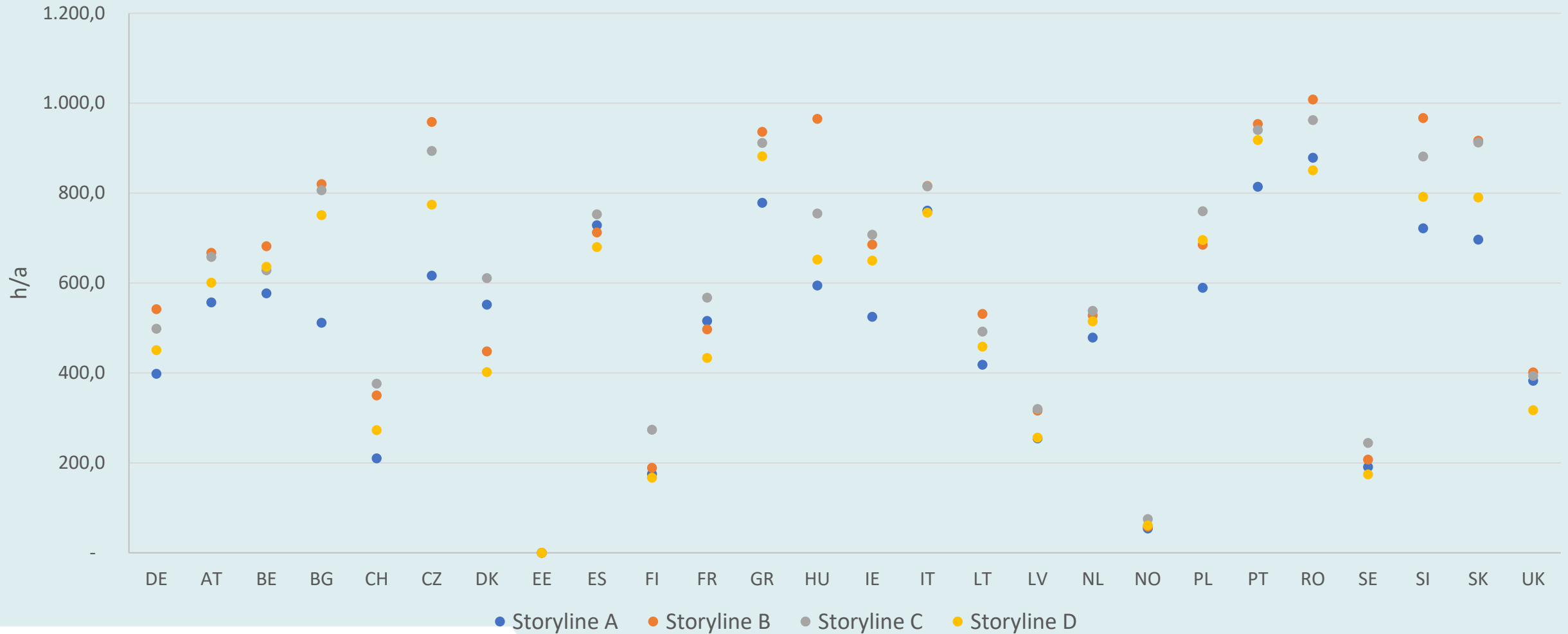
Volllaststunden Kernkraftwerke (2045)



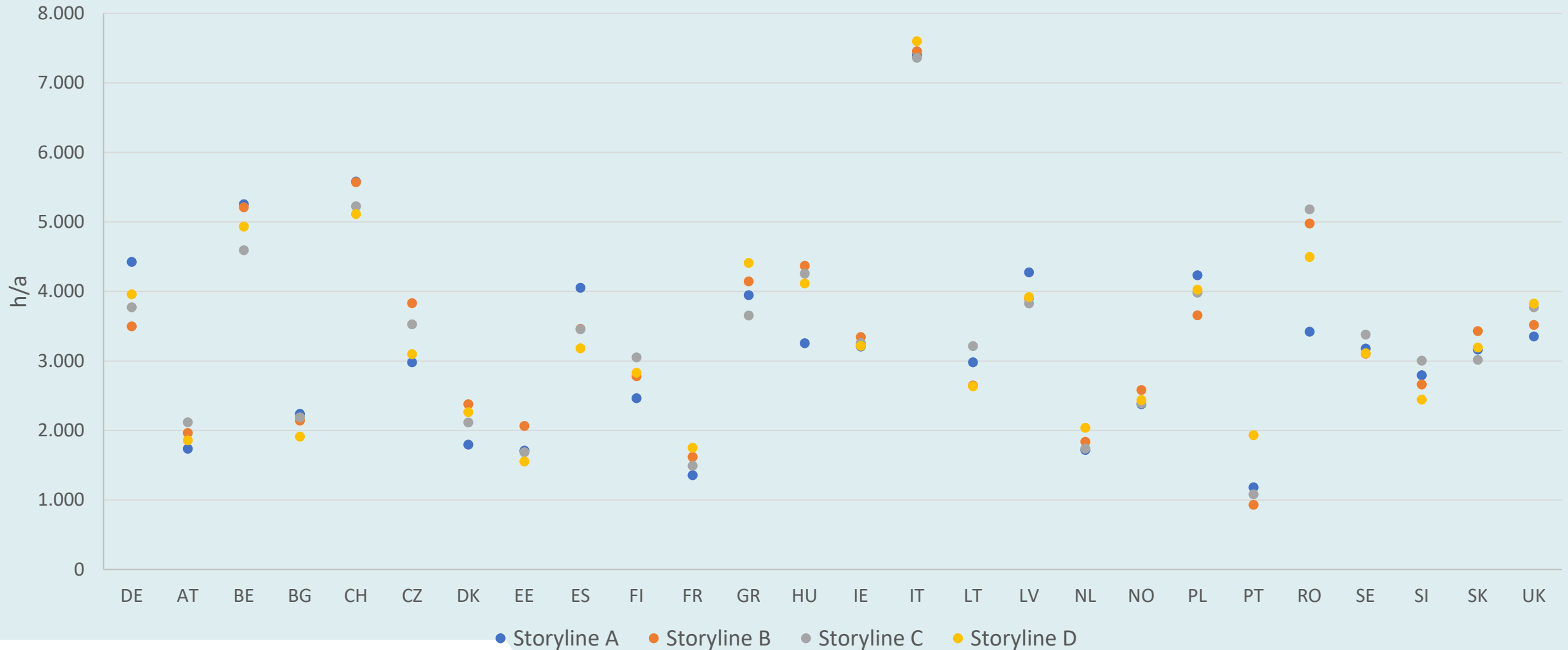
GEFÖRDERT VOM



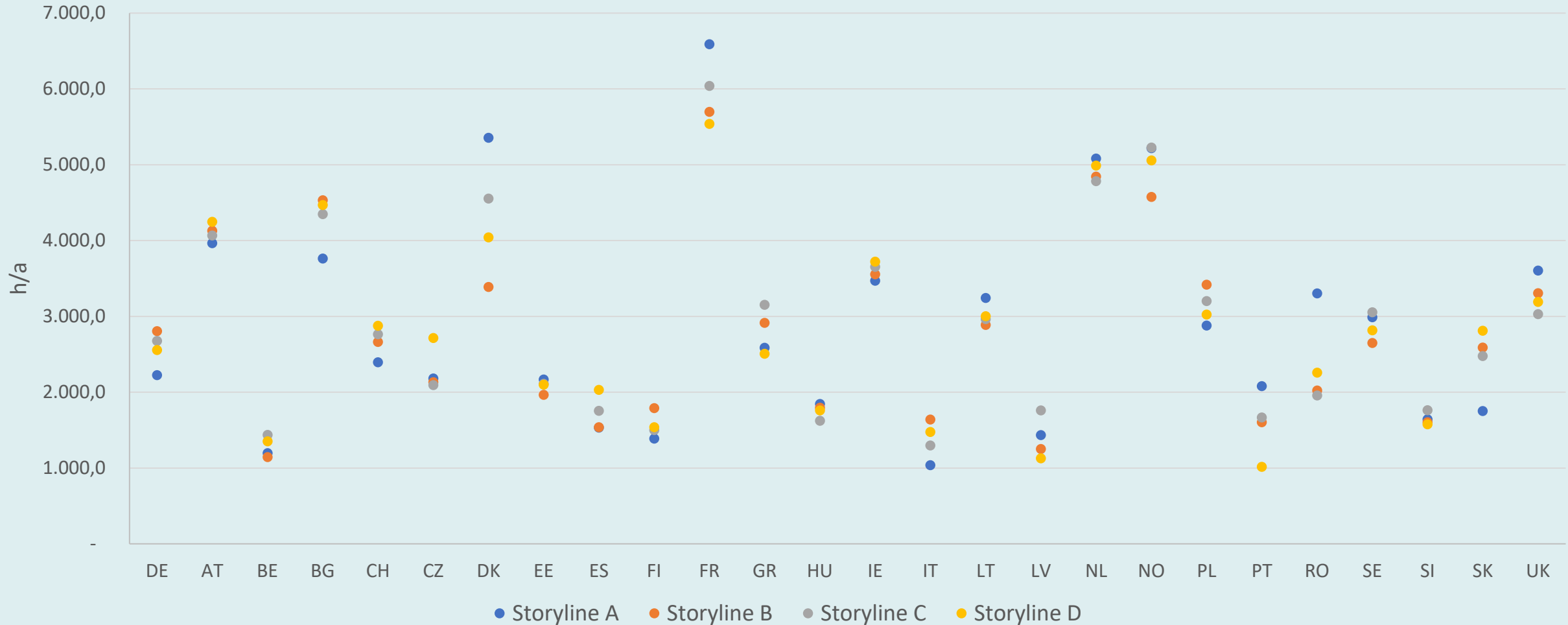
Volllaststunden Pumpspeicherwerke (PSW) & Großbatterien (2045)



Volllaststunden der Stromimporte (2045)



Volllaststunden Stromexporte (2045)



Autorinnen und Autoren

› Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI)

- › Polina Emelianova
- › Julian Keutz
- › Philipp Artur Kienscherf
- › Lena Pickert



› Öko-Institut

- › Matthias Koch
- › Christof Timpe
- › Dominik Seebach
- › Malte bei der Wieden



› Deutsche Umwelthilfe

- › Liv Becker
- › Nadine Bethge



GEFÖRDERT VOM