



Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit



Modellierung von
Energienachfrageszenarien für das
Bundesland Oberösterreich als Wegweiser
zur dekarbonisierten Energiezukunft

Alexander Walter Lurz, BSc

September 2023



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 15.09.2023

Alexander Lurz

Unterschrift Verfasser/in
Alexander Walter Lurz

KURZFASSUNG

Angesichts globaler Bemühungen zur Emissionsminderung von Treibhausgasen haben sich Energienachfrageszenarien als probates Werkzeug etabliert, um vielversprechende Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralitätsziele zu identifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit soll für Oberösterreich, das stark industrialisierte, THG-intensivste Bundesland Österreichs, eine Bandbreite von Entwicklungsmöglichkeiten in Bezug auf Energieverbrauch und THG-Emissionen aufgespannt werden. Dazu dient die Modellierung von drei unterschiedlichen Energienachfrageszenarien bis zum Jahr 2050, die die Identifikation von Schwerpunkten und Handlungsfeldern ermöglicht.

Das Szenario Trend spiegelt die historische Entwicklung der Energienachfrage wider und trägt gleichzeitig als Referenzszenario für die alternativen Entwicklungsmöglichkeiten zur Evaluierung der Wirksamkeit getroffener Maßnahmen und Annahmen bei. Das Szenario With Additional Measures - Oberösterreich (WAM-OÖ) repräsentiert einen Weg der Entwicklung Oberösterreichs, bei dem sowohl bereits umgesetzte als auch geplante politische Vorgaben und industrielle Technologieumstellungen berücksichtigt werden. Das Szenario Sektorkopplung (SK) zielt darauf ab, einen möglichen Pfad zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 darzustellen. Dazu wird mittels linearer Optimierung ein Szenario modelliert, in dem die jährliche Primärenergienachfrage – zur Deckung des Nutzenergiebedarfs aus dem Szenario Trend im Jahr 2050 – den Minimalwert erreicht.

Im Szenario Trend zeigt sich ein steigender Endenergieverbrauch um ca. 18,2 TWh bei gleichzeitiger Zunahme der THG-Emissionen um ca. 2,6 MtCO_{2e} bis zum Jahr 2050. Im Szenario SK sinkt der Energieverbrauch um ca. 17,3 TWh bis 2050 und durch Elektrifizierung in allen Wirtschaftssektoren sowie den Einsatz von Biomethan, grünem Wasserstoff und industrieller Abwärme wird Klimaneutralität erreicht. Im Szenario WAM-OÖ werden die Energieeinsparungen aufgrund von Effizienzsteigerungen und Technologieumstellungen durch Faktoren wie Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum kompensiert. Daraus resultiert eine Steigerung des Energiebedarfs von 3,3 TWh bis zum Jahr 2050, wobei die THG-Emissionen um ca. 11 MtCO_{2e} auf 7 MtCO_{2e} sinken. Die gleichzeitige Zunahme des Energieverbrauchs und Abnahme der THG-Emissionen kann über einen stattfindenden fuel-shift plausibilisiert werden. In den Szenarien WAM-OÖ und SK erfolgt die zunehmende Substitution fossiler durch klimaneutrale Energieträger. Insbesondere der Bedarf an grünem Gas und Strom steigt innerhalb dieser Szenarien massiv. Daraus resultiert zukünftig die Herausforderung, ausreichend Kapazitäten an erneuerbaren Energiequellen zu schaffen sowie die Infrastruktur leitungsgebundener Energieträger und Flexibilitätsoptionen zu erweitern.

ABSTRACT

In view of global efforts to reduce greenhouse gas emissions, energy demand scenarios have established themselves as a proven tool to identify promising measures to achieve climate neutrality goals. In the context of this work, a range of development options with regard to energy consumption and GHG emissions is to be mapped for Upper Austria, the highly industrialized, most GHG-intensive province of Austria. This is done by modelling three different energy demand scenarios up to the year 2050, which enables the identification of priorities and action plans.

The first scenario called Trend reflects the historical development of energy demand and at the same time serves as a reference for alternative development options to evaluate the effectiveness of measures and assumptions made. The second scenario named With Additional Measures - Upper Austria (WAM-OÖ) represents a path of development for Upper Austria that considers both already implemented and planned political requirements and industrial technology conversions. The third scenario called Sector Coupling (SK) aims to represent a possible path to achieve climate neutrality by 2050. Here, linear optimization is used to model a scenario in which the annual primary exergy demand reaches the minimum value, required to cover the useful energy demand from the scenario Trend in 2050.

The scenario Trend shows an increasing final energy consumption of about 18.2 TWh with a simultaneous increase of GHG emissions by about 2.6 MtCO_{2e} until 2050. In the scenario SK, energy consumption decreases by about 17.3 TWh until 2050 and climate neutrality is achieved through electrification in all economic sectors as well as the use of biomethane, green hydrogen and potential industrial waste heat. In the scenario WAM-OÖ, energy savings due to efficiency improvements and technology changes are offset by factors such as population and economic growth. This results in an increase in energy demand of 3.3 TWh by 2050, while GHG emissions decrease by about 11 MtCO_{2e} to 7 MtCO_{2e}. The simultaneous increase in energy consumption and decrease in GHG emissions can be explained by the fuel shift. In the scenarios WAM-OÖ and SK, fossil fuels are increasingly substituted by climate-neutral energy sources. In particular, the demand for green gas and electricity increases massively within these scenarios. This results in the future challenge of creating sufficient capacities of renewable energy sources as well as expanding the infrastructure of grid-based energy sources along with sectorcoupling flexibility options.

VORWORT

An erster Stelle möchte ich mich herzlichst bei meinen Eltern Ingrid und Walter bedanken, die mich während der gesamten Studienzeit unterstützt und immer an mich geglaubt haben. Ihr seid für mich Vorbilder in allen Belangen, sei es das tolle Familienleben, der aktive und gesunde Lebensstil oder eure liebenswürdige, offene und tolerante Art den Mitmenschen gegenüber. Außerdem danke ich ganz besonders meinen Schwestern Martina und Eva, ich schätze es sehr, dass ich immer auf eure Unterstützung zählen kann. Ein wichtiger Ausgleich zum Studium stellten für mich die sportlichen Aktivitäten mit meinem Tenniskollegen und Freund Christoph dar. Danke Chrissi, du hast immer ein offenes Ohr für mich und ich kann mit dir über alles reden, ohne verurteilt zu werden.

Großer Dank für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit über ein derartig spannendes und aktuell breit diskutiertes Thema zu verfassen, gebührt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Kienberger und dem gesamten Team des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik. Ich habe im Laufe der Arbeit ein sehr positives Arbeitsklima erlebt, das weder Kollegialität noch Professionalität missen lässt.

Meinem Betreuer Dipl. Ing. Peter Nagovnak möchte ich besonders positiv erwähnen und mich bei ihm bedanken. Peter, deine intensive Unterstützung bei der Arbeit sowie deine Geduld, um offene Fragen zu klären und mit mir deine Expertise zu teilen weiß ich wirklich zu schätzen. Du bist immer erreichbar, wenn du gebraucht wirst und hast auf jede Frage passende Antworten parat. Ich bin froh darüber, in den letzten Monaten sehr viel von dir gelernt haben zu können.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Methodik	5
3.1	Beschreibung der Datenbasis	6
3.1.1	Energiebilanz	7
3.1.2	Nutzenergieanalyse.....	8
3.1.3	Zusammenführung der Energieträger	8
3.1.4	Bilanzgebiet	10
3.2	THG-Emissionen	12
3.2.1	Prozessbedingte THG-Emissionen.....	14
3.3	Szenarienentwicklung	15
3.3.1	Wirtschaftliche Annahmen.....	17
3.3.2	Demographische Annahmen	17
3.3.3	Weitere Annahmen	17
3.4	Modellierung Szenario Trend	18
3.5	Modellierung Szenario WAM-OÖ.....	19
3.5.1	Industriesektoren	19
3.5.2	Gebäudesektoren.....	22
3.5.3	Transportsektoren.....	23
3.6	Modellierung Szenario Sektorkopplung	24
3.6.1	Entwicklung Sektorkopplung	25
4	Ergebnisse und Diskussion der Szenarien	27
4.1	Ergebnisse Trend	27
4.2	Ergebnisse WAM-OÖ	30
4.3	Ergebnisse Sektorkopplung	34
4.4	Ergebnisdiskussion	36

4.4.1	Vergleich und Analyse der Energienachfrageszenarien	37
4.4.2	Handlungsfelder zur Dekarbonisierung	40
4.4.2.1	Verbesserungen der Energieeffizienz	41
4.4.2.2	Carbon Capture	41
4.4.2.3	Fuel-switching	42
4.4.2.4	Elektrifizierung	42
4.4.3	Infrastrukturbetrachtung.....	45
5	Zusammenfassung und Ausblick	48
6	Literaturverzeichnis	50
7	Anhang	55
7.1	Modellierung Szenario ISB	57
7.1.1	Modifikationen im Verkehr	57
7.1.2	Modifikationen im Gebäudesektor	59
7.2	Ergebnisse ISB	59

NOMENKLATUR

Abkürzungen

AEA	Austrian Energy Agency
BIP	Bruttoinlandsprodukt
EE	Energetischer Endverbrauch
EVU	Energieversorgungsunternehmen
HBI	Hot-Briquetted-Iron
NEA	Nutzenergieanalyse
NEFI	New Energy for Industry
NEV	Nicht-energetischer Verbrauch
NG-DR	Natural Gas – Direct Reduction
Oemof	Open Energy Modelling Framework
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
OÖ	Oberösterreich
ÖROK	Österreichische Raumordnungskonferenz
POI	Pathway of Industry
SK	Sektorkopplung
UA	Umwandlungsausstoß
UBA	Umweltbundesamt
UE	Umwandlungseinsatz
UEA	Unternehmenseigene Anlagen
VSE	Verbrauch Sektor Energie
WAM	With Additional Measures
WEM	With Existing Measures
WIFO	Wirtschaftsforschungsinstitut

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: THG-Emissionen im Jahr 2018 auf Bundesländerebene [5]	2
Abbildung 3-1: Die Energienachfageszenarien spannen eine Bandbreite an Entwicklungsmöglichkeiten über die Stützjahre 2030, 2035 und 2040 bis zum Ende des Betrachtungszeitraums 2050 auf	6
Abbildung 3-2: Aufbau der NEA [8].....	8
Abbildung 3-3: Auswahl des betrachteten Bilanzgebietes je Sektor (Eigene Darstellung in Anlehnung an „Erneuerbares Gas in Österreich“ [13] S. 14)	11
Abbildung 3-4: Technologieumstellung der Voestalpine AG in Linz zur Primärstahlerzeugung (in Anlehnung an das Szenario POI und den Dekarbonisierungsplan greentec steel [16, 26]).....	22
Abbildung 3-5: Der Weg vom Endenergiebedarf Szenario 2050 bis hin zum minimalen Primärenergiebedarf für das Szenario SK 2050	25
Abbildung 4-1: Gesamtenergiebedarf nach Energieträgern – Trend	28
Abbildung 4-2: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – Trend	30
Abbildung 4-3: Gesamtenergiebedarf nach Energieträger – WAM-OÖ.....	31
Abbildung 4-4: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – WAM-OÖ.....	34
Abbildung 4-5: SK - Gesamtenergiebedarf nach Energieträger	35
Abbildung 4-6: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – SK	36
Abbildung 4-7: Gesamtenergiebedarf – Vergleich der Szenarien	38
Abbildung 4-8: Delta-Diagramm: Vergleich WAM-OÖ bzw. SK mit dem Szenario Trend	40
Abbildung 4-9: Delta-Diagramm: Vergleich ISB versus WAM-OÖ für Transport- und Gebäudesektoren	46
Abbildung 4-11: Entwicklung des Bedarfs an leitungsgebundenen Energieträgern im Szenario ISB	47
Abbildung 7-1: ISB - Gesamtenergiebedarf nach Energieträger	60
Abbildung 7-2: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – ISB	61
Abbildung 7-3: Gesamtenergiebedarf des Sektors Eisen- und Stahlerzeugung – Szenario WAM-OÖ.....	62
Abbildung 7-4: Endenergieverbrauch von PKW und LKW im Szenarienvergleich ISB vs. WAM-OÖ bei gleichbleibendem Nutzenergiebedarf (d.h. gefahrene Kilometer)	62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Energiebilanz [9]	7
Tabelle 3-2: Zusammenführung der Energieträger für die Energienachfrageszenarien.....	9
Tabelle 3-3: Aufteilung der "Umgebungswärme etc." aus der NEA in Umgebungswärme und Solarthermie	10
Tabelle 3-4: Prozessenergiebedarfe je Sektor und Anlage	11
Tabelle 3-5: Spezifische CO ₂ e-Emissionsfaktoren je Energieträger	13
Tabelle 3-6: Spezifischer THG-Ausstoß für Gas im Szenario WAM-OÖ und SK, abhängig vom Betrachtungsjahr (nach NEFI [16])	14
Tabelle 3-7: Entwicklungsfaktoren für Szenarien Trend und WAM-OÖ	15
Tabelle 3-8: Bottom-up betrachtete Unternehmen und deren Produktionsmengen [16]	20
Tabelle 3-9: Carbon-Capture Raten in der Zementindustrie [16]	21
Tabelle 3-10: Anteile der Energieträger am Gesamtenergieverbrauch 2050 für den Sektor „sonstiger Landverkehr“ [22]	23
Tabelle 3-11: Faktoren zur Erstellung des Szenarios SK: Einschleifung des Szenarios SK in das Szenario Trend	26
Tabelle 4-1: Energiebedingte und prozessbedingte THG-Emissionen WAM-OÖ	32
Tabelle 4-2: Prozessbedingter THG-Ausstoß der Voestalpine AG in Linz.....	32
Tabelle 4-3: Prozessbedingter THG-Ausstoß der Zementindustrie	32
Tabelle 4-4: Strombedarf in der Industrie je Szenario und Betrachtungsjahr	43
Tabelle 4-5: Strombedarf für Wärmepumpen in den Gebäudesektoren je Szenario und Betrachtungsjahr	43
Tabelle 4-6: Strombedarf für den Verkehr (PKW, LKW) je Szenario und Betrachtungsjahr	44
Tabelle 7-1: Auflistung der Sektoren innerhalb der Nutzenergieanalyse nach [10]	55
Tabelle 7-2: Angenommene Technologieeffizienzen zur Umrechnung von Endenergie auf Nutzenergie	56
Tabelle 7-3: Nutzenergiebedarf im Kraftverkehr im Szenario ISB	58
Tabelle 7-4: Wirkungsgrade der Antriebstechnologien	59
Tabelle 7-5: Endenergie-Elektrifizierungsgrad der PKWs im Szenario ISB	59

1 EINLEITUNG

Im Jahr 2015 einigten sich 197 Staaten auf das Pariser Abkommen, einen neuen Weltklimavertrag, der ein globales, ambitioniertes und rechtsverbindliches Vertragswerk zum Klimaschutz darstellt und so einen Durchbruch in der internationalen Klimapolitik markiert [1].

Es beinhaltet unter anderem die ehrgeizigen Ziele, dass:

- „die globale Erderwärmung auf maximal 2 Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten begrenzt werden soll und zudem Anstrengungen unternommen werden sollen, den Anstieg auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen.“ [2]
- „die globalen Treibhausgasemissionen so bald wie möglich ihr Maximum erreichen sollen und bis Mitte des 21. Jahrhunderts auf (netto) null gesenkt werden sollen.“ [2]

Österreich hat sich als Mitgliedstaat der EU dazu verpflichtet, dem Pariser Abkommen nachzukommen und darüber hinaus das ambitionierte Ziel gesetzt, Klimaneutralität bereits mit dem Jahr 2040 zu erreichen. Um dieser angestrebten, vollständigen Dekarbonisierung gerecht zu werden, erfordert es in jedem einzelnen Bundesland Österreichs und zudem in jedem Sektor (Industrie, Transport, Gebäude) eine koordinierte Herangehensweise sowie weitreichende Maßnahmen. Um die Auswirkungen gesetzter Maßnahmen qualitativ bewerten und quantifizieren zu können, haben sich Energienachfrageszenarien als bewährtes Werkzeug etabliert (z.B. EU Reference Scenario [3], Szenario With Existing Measures (WEM) und Szenario With Additional Measures (WAM) der Austrian Energy Agency (AEA) [4] etc.). Die Modellierung mehrerer Energieszenarien ermöglicht gleichzeitig eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Szenarienergebnisse sowie einen Vergleich der Szenarien untereinander. Da eine solche Analyse für das Bundesland Oberösterreich (OÖ) noch nicht vorliegt, werden im Rahmen dieser Arbeit drei Energienachfrageszenarien für das Bundesland erstellt. Oberösterreich ist das Bundesland mit den meisten THG-Emissionen in Österreich [5], wodurch das Aufspannen mehrerer Entwicklungsmöglichkeiten mithilfe der Energieszenarien von besonderer Bedeutung für Österreichs Klima- und Energiepolitik ist. Abbildung 1-1 stellt die Treibhausgas-Emissionen auf Bundesländerebene dar. Im Jahr 2018 verursacht Oberösterreich 21,5 MtCO_{2e} und verantwortet damit über 27% der gesamten THG-Emission Österreichs (79 MtCO_{2e}).

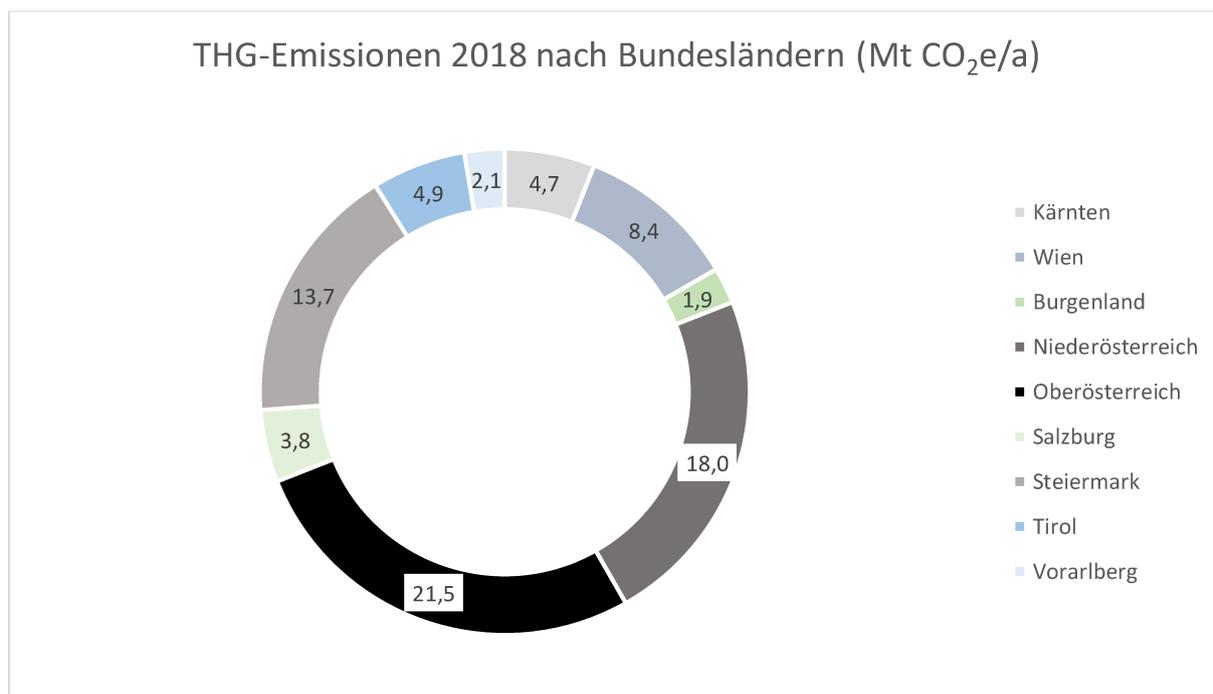


Abbildung 1-1: THG-Emissionen im Jahr 2018 auf Bundesländerebene [5]

Die in dieser Arbeit untersuchten Energienachfrageszenarien werden jeweils bis zum Jahr 2050 modelliert, wobei den Stützjahren 2030, 2035 und 2040 besondere Aufmerksamkeit zukommt. Sie verfolgen verschiedene Ansätze der Modellierungsmethodik, um eine ausreichende Diversität der Entwicklungsmöglichkeiten zu schaffen, sodass die Identifikation der wichtigsten Handlungsfelder ermöglicht wird. Das Basisszenario, das unter anderem als Referenz für die beiden anderen Szenarien dient, stellt das Szenario Trend dar. Das Szenario Trend spiegelt die historische Entwicklung der Energienachfrage, aufgelöst auf Energieträger, Nutzenergiekategorien, sowie Wirtschaftssektoren, wider. Durch die kontinuierliche Extrapolation der Energienachfrage der vergangenen Jahre lassen sich Einblicke in die mögliche Entwicklung des Energiebedarfs sowie der damit verbundenen THG-Emissionen gewinnen, sollten zukünftig keine weiteren Maßnahmen getroffen werden. Außerdem dient es zur Beurteilung der Wirksamkeit politischer Maßnahmen, Technologieumstellungen und Effizienzsteigerungen, die in den anderen Szenarien implementiert sind. So berücksichtigt das Szenario With Additional Measures - Oberösterreich (WAM-OÖ) bereits beschlossene und geplante politische Maßnahmen wie den Ausstieg fossiler Heizungssysteme zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs, ambitioniertere Sanierungsraten und Effizienzerhöhungen. Außerdem modelliert das Szenario WAM-OÖ industrielle Technologieumstellungen, die bereits von den wichtigsten Vertretern der einzelnen Industriesektoren kommuniziert wurden. Die dritte Entwicklungsmöglichkeit stellt das Szenario Sektorkopplung (SK) dar, das das Ziel der Exergieminimierung verfolgt. Auf Basis der benötigten, zeitlich aufgelösten Nutzenergiemengen aus dem Szenario Trend ermittelt ein mathematischer Optimierungsansatz nach Sejkora et al. 2022 [6] den systemisch

effizientesten Gesamtenergieeinsatz in den einzelnen Sektoren. Außerdem verfolgt die Modellierungsumgebung des Szenarios SK das Ziel der vollständigen Dekarbonisierung bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes im Jahr 2050.

2 AUFGABENSTELLUNG

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sollen im Rahmen dieser Arbeit drei unterschiedliche Energienachfrageszenarien für das Bundesland Oberösterreich erstellt und analysiert werden. Durch die Anwendung szenarienspezifischer Methodiken gilt es, die Frage zu klären, wie sich der Energiebedarf, sowie die einzelnen Energieträger und die zugehörigen THG-Emissionen, innerhalb der jeweiligen Szenarien entwickeln. Darüber hinaus soll ein Eindruck über das Ausmaß des fuel-shifts (die Substitution eines Energieträgers durch einen anderen) von fossilen Energieträgern wie Kohle oder Öl hin zu klimaneutralen Energieträgern erlangt werden, um den Weg zur Klimaneutralität erfolgreich beschreiten zu können.

Mithilfe individueller Methodiken zur Modellierung der Szenarien soll eine Bandbreite an Entwicklungsmöglichkeiten aufgespannt werden, um im Zuge der Ergebnisdarstellung und -diskussion die Identifikation von bedeutenden Handlungsfeldern zu ermöglichen. Dadurch können jene Maßnahmen abgeleitet werden, die den größten Einfluss auf die zu untersuchenden Größen

- Gesamtenergiebedarf
- THG-Emissionen
- Fuel-switch

haben. Unter fuel-switch ist die Substitution von Energieträgern untereinander zu verstehen, die in Verschiebungen der Anteile an eingesetzten Energieträgern resultiert.

Dazu wird der Ansatz einer differenzierten Analyse der einzelnen endenergieverbrauchenden Wirtschaftssektoren verfolgt, die sich an der Nutzenergieanalyse (NEA) der Statistik Austria orientiert (siehe Kapitel 3.1.2). Dabei wird der gesamte Endenergiebedarf auf 21 Sektoren aufgeteilt (siehe Tabelle 7-1 im Anhang), wobei diese drei Hauptsektoren zugeordnet werden können:

- Industrie
- Transport
- Gebäude

Es erfolgt eine individuelle Betrachtung der 13 Industriesektoren, fünf Transportsektoren und drei Gebäudesektoren, weitere Details zur NEA werden in Kapitel 3.1.2 erläutert. Zur Erfüllung des Hauptziels dieser Arbeit – die Modellierung verschiedener Entwicklungsmöglichkeiten als Wegweiser zur dekarbonisierten Energiezukunft für Oberösterreich und die Identifikation

jener Maßnahmen, die dies ermöglichen – gilt es, insbesondere energieintensive Sektoren, die einen Großteil der THG-Emissionen verursachen, zu identifizieren und im Detail zu analysieren. Daher erfolgt im Szenario WAM-OÖ für die relevanten Industriesektoren die Erweiterung der top-down Methodik um eine Bottom-up Betrachtung energie- und treibhausgasintensiver Unternehmen. Anhand der jährlichen Produktionsmengen und des spezifischen Energiebedarfs sowie der spezifischen THG-Emissionen je Tonne Produkt dieser Unternehmen soll die Genauigkeit der Top-down Methodik verbessert werden (siehe Kapitel 3.5.1). Die Bottom-up Betrachtung ermöglicht zusätzlich die Analyse der Entwicklung prozessbedingter THG-Emissionen, abhängig von geplanten Technologieumstellungen der Industriesektoren. Innerhalb der Transportsektoren gilt es, dem energie- und emissionsintensiven Sektor „sonstiger Landverkehr“, der unter anderem den Straßen-Kraftverkehr widerspiegelt, besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Dies ermöglicht die Identifikation der Auswirkung szenariendifferenzierter Entwicklungen im Verkehr in Bezug auf THG-Emissionen, Nutzenergie, Endenergie sowie Elektrifizierungsgrad. Bei den Gebäudesektoren stellt die Technologieauswahl zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs einen wichtigen Hebel zur möglichen Dekarbonisierung dar. In diesem Zusammenhang gibt es einige politische Maßnahmen, wodurch sich bereits heute ein zukünftiger fuel-shift, durch die vermehrte Nutzung von Wärmepumpen anstelle fossil betriebener Heizkessel, abzeichnet. Außerdem soll die Auswirkung szenarienspezifischer Sanierungsraten auf den Gesamtenergiebedarf untersucht werden.

Für die Erstellung von Energienachfrageszenarien ist die Definition eines Bilanzgebietes essenziell, da so eine einheitliche Vorgehensweise zur Erstellung der jeweiligen Szenarien gewährleistet werden kann. Im Gegensatz zu den Transport- und Gebäudesektoren können innerhalb der Industrieunternehmen prozessbedingte Energiebedarfe auftreten, die nicht in den Daten zur Endenergienachfrage enthalten sind. Weitere Details zur Datenbasis und zur Definition des Bilanzgebietes werden in Kapitel 3.1.1 ausführlich erläutert.

3 METHODIK

In diesem Kapitel soll die angewandte Methodik zur Modellierung der Energienachfrageszenarien erläutert werden. Zuerst erfolgt in einem allgemeinen Teil bis Kapitel 3.3 die Beschreibung und Definition der Datenbasis sowie der Bilanzgrenze und der allgemeinen Szenarientwicklung. Anschließend wird in den weiteren Kapiteln 3.4 bis 3.6 auf die spezifischen Strategien zur Szenarientwicklung eingegangen. Abbildung 3-1 bietet eine Übersicht zur Erstellung der drei Energienachfrageszenarien, ausgehend vom Basisjahr 2019, bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes im Jahr 2050, wobei insbesondere den dazwischenliegenden Stützjahren 2030, 2035 und 2040 Aufmerksamkeit geschenkt wird. Als Referenzszenario dient das Szenario Trend, in dem der aktuelle Trend der Energienachfrage fortgeschrieben wird, um zu zeigen, wie sich die Energienachfrage entwickeln würde, sollten keine Maßnahmen in Bezug auf politische Vorgaben, Effizienzsteigerungen oder Technologieänderungen ergriffen werden. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das Szenario With Additional Measures - Oberösterreich (WAM-OÖ) aktuelle Ziele und Maßnahmen, wie eine Steigerung der Sanierungsraten und Effizienzerhöhungen in den Gebäude- sowie Technologieumstellungen in den Industriesektoren. Das Szenario Sektorkopplung (SK) ist ein exergieoptimiertes Szenario, das auf dem Modellierungsframework „oemof“ (Open Energy Modelling Framework) basiert [7]. Durch Anwendung szenarienspezifischer Methodiken kann eine Bandbreite an Entwicklungsmöglichkeiten aufgespannt werden. Anschließend erfolgt eine Visualisierung der Ergebnisse der einzelnen Szenarien mithilfe von Diagrammen. Im Rahmen der Diskussion findet eine Gegenüberstellung der drei Entwicklungsmöglichkeiten, insbesondere mit dem Referenzszenario Trend statt, wodurch Erkenntnisse generiert und analysiert werden können. Weitere Details zur genauen Methodik der einzelnen Szenarien werden in den Kapiteln 3.4, 3.5, und 3.6 präsentiert.

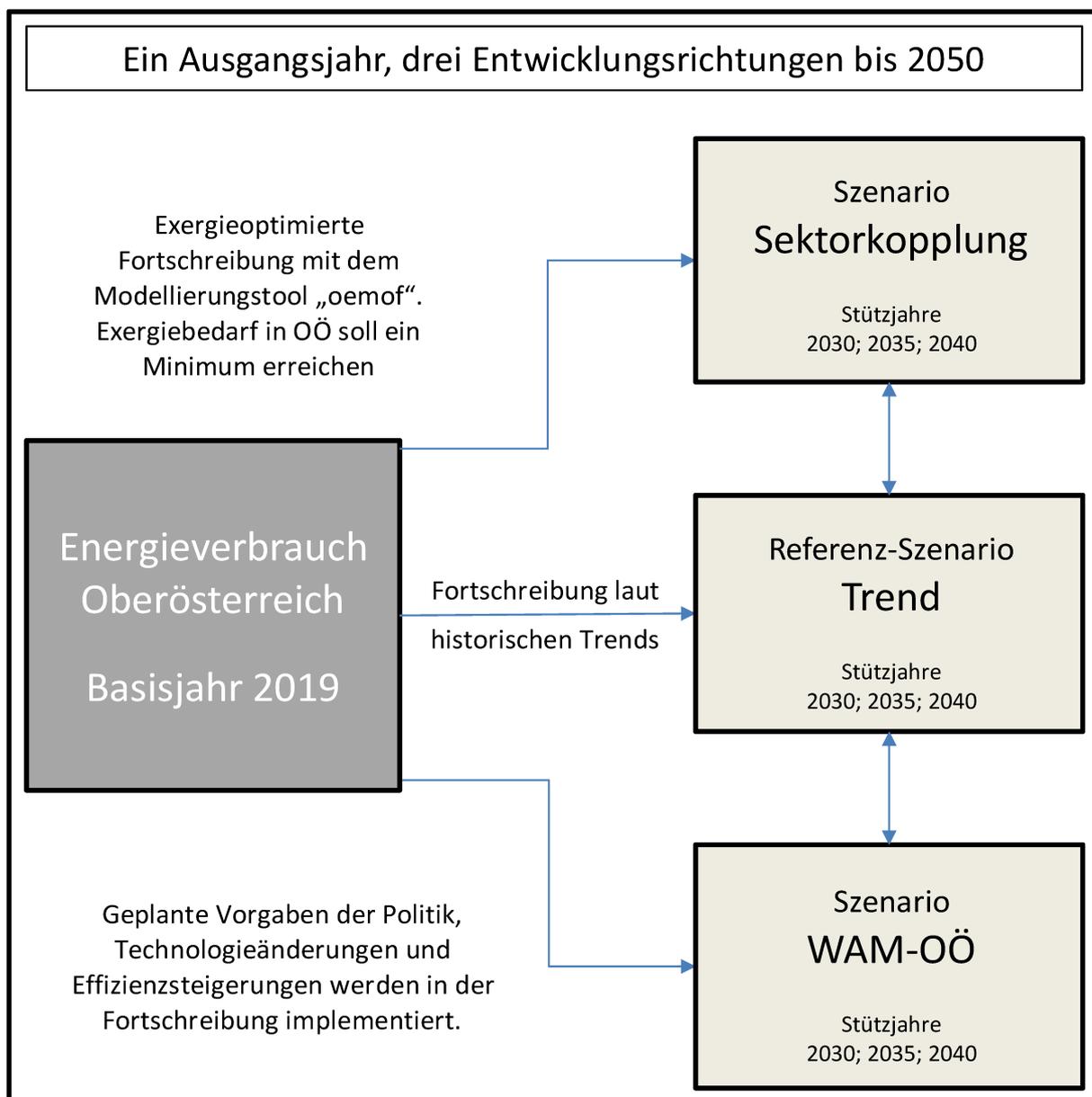


Abbildung 3-1: Die Energienachfageszenarien spannen eine Bandbreite an Entwicklungsmöglichkeiten über die Stützjahre 2030, 2035 und 2040 bis zum Ende des Betrachtungszeitraums 2050 auf

3.1 Beschreibung der Datenbasis

Die Datenbasis für die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Energienachfageszenarien stellt die Energiebilanz der Statistik Austria für das Bundesland Oberösterreich, insbesondere der daraus abgeleiteten Nutzenergieanalyse (NEA) dar [8, 9]. Die Energiebilanz wird in Kapitel 3.1.1 beschrieben, die NEA im Anschluss daran in Kapitel 3.1.2. Als Ausgangsjahr wird das Jahr 2019 gewählt, da in diesem Jahr keine Auswirkungen der COVID-19 Pandemie auf den Energieverbrauch zu verzeichnen sind. Im Gegensatz dazu ist zu befürchten, dass in den Folgejahren 2020 und 2021 der Einfluss der Pandemie, insbesondere der Lockdowns, deutlich

spürbar ist und zu einer Verzerrung der Daten führt. Neben der Datenbasis ist die Definition von Bilanzgrenzen zur konsistenten Erstellung von Energienachfrageszenarien essenziell. Die genaue Vorgehensweise für die Bilanzgrenzen der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Energienachfrageszenarien werden im Kapitel 3.1.4 erläutert.

3.1.1 Energiebilanz

Die Energiebilanz, erhoben von der Statistik Austria, für das Bundesland Oberösterreich stellt ein ganzheitliches Bild der Energieflüsse dar. Darin werden sowohl Importe / Exporte, Lagerbestandsveränderungen als auch Umwandlungseinsätze, Umwandlungsausstöße, nicht-energetische Verbräuche, etc. berücksichtigt, wodurch am Ende der „Energetische Endverbrauch“ resultiert (siehe Tabelle 3-1). Die NEA hingegen umfasst ausschließlich den „Energetischen Endverbrauch“, worin der industrielle, prozessbedingte Einsatz von Energieträgern nicht enthalten ist. In der Nutzenergieanalyse werden alle endenergiekonsumierenden Anlagen und Geräte, nicht allerdings die vorgelagerte Erzeugung der Energieträger, erfasst. Dies bedeutet, dass beispielsweise der Umwandlungseinsatz von Kraftwerken in Energieversorgungsunternehmen (EVU) oder in unternehmenseigenen Anlagen (UEA) in der NEA nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 3-1: Energiebilanz [9]

Energiebilanz
Inländische Erzeugung
± Importe / Exporte
± Lager
= Bruttoinlandsverbrauch
– Umwandlungseinsatz (UE) in Energieversorgungsunternehmen (EVU)
– Umwandlungseinsatz in unternehmens-eigenen Anlagen (UEA)
+ Umwandlungsausstoß (UA)
Verbrauch Sektor Energie (VSE) in EVU
– Verbrauch Sektor Energie in UEA
– Nicht energetischer Verbrauch (NEV)
– Verluste
= Energetischer Endverbrauch (EE) (Entspricht der NEA)

3.1.2 Nutzenergieanalyse

Die Nutzenergieanalyse ist ein Instrument zur jährlichen Bereitstellung von Daten zu den Einsatzzwecken der Energieträger im energetischen Endverbrauch, gegliedert nach Wirtschaftssektoren und Nutzenergiekategorien. Die Datenerfassung erfolgt durch Konzentrationsstichproben im Rahmen der Gütereinsatzstatistik [10]. Die NEA besteht aus insgesamt 21 Sektoren, 13 davon werden als Industriesektoren sowie fünf als Transport- und drei als Gebäudesektoren definiert (siehe Tabelle 7-1 im Anhang). Die Aufteilung in Nutzenergiekategorien ermöglicht die Auswirkungen von Entwicklungsfaktoren, die in Kapitel 3.3 genauer beschrieben werden, besser berücksichtigen zu können. Um den Aufbau der NEA zu visualisieren, dient Abbildung 3-2, in der beispielhaft der Sektor „Private Haushalte“ dargestellt wird. In der Abbildung 3-2 werden Energieträger vertikal auf der linken Seite und Nutzenergiekategorien (Raumklima und Warmwasser, Prozesswärme, Standmotoren etc.) horizontal, in der obersten Zeile, eingetragen.

Private Haushalte	Raumklima und Warmwasser	Prozesswärme <200 °C	Prozesswärme >200 °C	Standmotoren	Verkehr	Beleuchtung und EDV	Elektrochemie	Summe
	in TJ							
Steinkohle	2	0	0	0	0	0	0	2
Braunkohle	54	0	3	0	0	0	0	57
Koks	42	0	11	0	0	0	0	53
Petrolkoks	0	0	0	0	0	0	0	0
Heizöl	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasöl für Heizzwecke	5834	0	660	0	0	0	0	6 494
Diesel	0	0	0	0	0	0	0	0
Benzin	0	0	0	0	0	0	0	0
Petroleum	0	0	0	0	0	0	0	0
Flüssiggas	463	0	32	0	0	0	0	495
Erdgas	8437	0	811	0	0	0	0	9 248
Elektrische Energie	1875	0	3007	4 501	0	1 820	0	11 203
Fernwärme	4 964	0	728	0	0	0	0	5 692
Scheitholz	9 011	0	647	0	0	0	0	9 658
Biogene Brenn- und Treibst	3 946	0	766	0	0	0	0	4 712
Brennbare Abfälle	0	0	0	0	0	0	0	0
Sonstige ET	1 837	0	1 061	0	0	0	0	2 897
Umgebungswärme etc.	1 837	0	1 061	0	0	0	0	2 897
Gichtgas	0	0	0	0	0	0	0	0
Kokereigas	0	0	0	0	0	0	0	0
Brennstoff	0	0	0	0	0	0	0	0
Insgesamt	36 464	0	7 726	4 501	0	1 820	0	50 511
Anteilig	72,2%	0,0%	15,3%	8,9%	0,0%	3,6%	0,0%	100,0%

Abbildung 3-2: Aufbau der NEA [8]

3.1.3 Zusammenführung der Energieträger

Für eine effizientere Vorgehensweise bei der Erstellung der Szenarien, wird im Zuge der Datenaufbereitung eine Zusammenfassung der Energieträger durchgeführt. Eine Übersicht der zusammengeführten Energieträger stellt Tabelle 3-2 dar. Dabei werden alle kohleförmigen Energieträger zu „Kohle“, ölförmige Energieträger zu „Öl“, gasförmige Energieträger zu „CH4 od. H2“ und biogene Energieträger und brennbare Abfälle zu „Biomasse und Abfall“ zusammengefasst. Die Zusammensetzung des Gases aus dem Gasnetz ändert sich im Rahmen des Betrachtungszeitraumes, je nach betrachtetem Szenario, wodurch die Benennung in CH4

od. H₂ erfolgt. Aufgrund der Tatsache, dass es Anwendungen gibt, wie z.B. die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie, in der die Zusammensetzung des dafür eingesetzten Gases grundsätzlich nebensächlich ist, wird im Rahmen dieser Arbeit in solchen Anwendungsgebieten nicht zwischen CH₄ und H₂ unterschieden. Zusätzlich werden die Energieträger CH₄ und H₂ separat eingeführt, da neben dem energiebedingten Bedarf auch dedizierter, prozessbedingter CH₄- bzw. H₂-Bedarf, je nach Szenario, besteht. Des Weiteren wird die in der NEA angeführte „Umgebungswärme etc.“ in „Umgebungswärme“ für Wärmepumpen und „Solarthermie“ aufgeteilt, da „Umgebungswärme etc.“ beides beinhaltet. Diese Aufteilung erfolgt anhand von Faktoren, die in Tabelle 3-3 dargestellt sind.

Tabelle 3-2: Zusammenführung der Energieträger für die Energienachfrageszenarien

Energieträger NEA	Energieträger Szenarien
Steinkohle, Braunkohle, Petrolkoks	Kohle
Heizöl, Gasöl für Heizzwecke, Diesel, Benzin, Petroleum	Öl
Flüssiggas, Erdgas, Wasserstoff, Biogas	CH ₄ od. H ₂
Scheitholz, biogene Brenn- und Treibstoffe, brennbare Abfälle	Biomasse und Abfall
Elektrische Energie	Elektrische Energie
Fernwärme	Fernwärme

Tabelle 3-3: Aufteilung der "Umgebungswärme etc." aus der NEA in Umgebungswärme und Solarthermie

Energieträger NEA		Energieträger Szenarien		
Umgebungswärme, etc.		Umgebungswärme, Solarthermie		
Sektor	Nutzenergiekategorie	Umgebungswärme	Solarthermie	Quelle
Private Haushalte	Prozesswärme > 200°C	60%	40%	[11]
Private Haushalte	Raumklima	60%	40%	[11]
Dienstleistungen	Raumklima	74%	26%	[12]
Landwirtschaft	Raumklima	100%	0%	Eigene Annahme

3.1.4 Bilanzgebiet

Um eine konsistente Vorgehensweise in der Erstellung der einzelnen Szenarien zu gewährleisten, ist die Auswahl eines definierten Bilanzgebietes von hoher Relevanz. Es erfolgt eine Differenzierung zwischen zwei verschiedenen Bilanzgrenzen (siehe Abbildung 3-3). Die Gebäude- und Transportsektoren weisen keine Prozessenergiebedarfe auf, wodurch die Bilanzgrenze dieser Sektoren lediglich den energetischen Endverbrauch umfasst (in orange dargestellt). Für die Industriesektoren wird eine Bilanzgrenze um alle Industriestandorte in Oberösterreich gelegt (in grün dargestellt). Damit wird sichergestellt, dass neben dem Endenergiebedarf, der durch die NEA abgebildet wird, auch der Prozessenergiebedarf der Industrieanlagen berücksichtigt wird, wie in Abbildung 3-3 dargestellt. Die vorgelagerte Erzeugung und Umwandlung der Energieträger durch Energieversorgungsunternehmen fällt nicht in den betrachteten Bilanzbereich und wird daher weder für Industrie- noch für Gebäude- und Transportsektoren berücksichtigt.

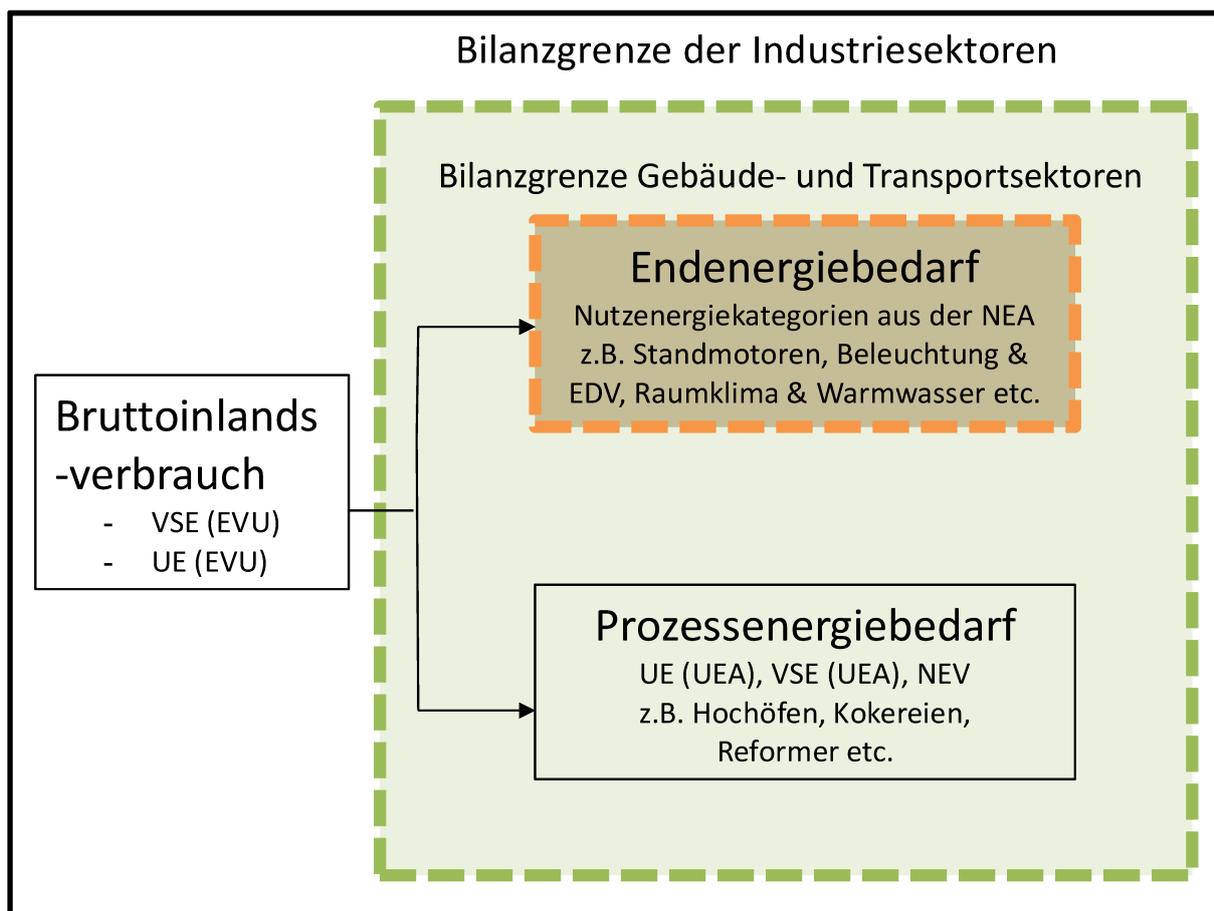


Abbildung 3-3: Auswahl des betrachteten Bilanzgebietes je Sektor
(Eigene Darstellung in Anlehnung an „Erneuerbares Gas in Österreich“ [13] S. 14)

Um einen umfassenden Überblick über alle Industriesektoren mit Prozessenergiebedarf, die in Oberösterreich von Bedeutung sind, zu ermöglichen, dient Tabelle 3-4. Der Prozessenergiebedarf beinhaltet den Umwandlungseinsatz für unternehmenseigene Anlagen wie Kokereien oder Hochöfen, den nicht-energetischen Verbrauch durch Reformier oder Zellstoffanlagen sowie den Verbrauch des Sektors Energie für unternehmenseigene Anlagen wie z.B. industrielle Kraftwerke oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

Tabelle 3-4: Prozessenergiebedarfe je Sektor und Anlage

Prozessenergiebedarf	Sektor	Anlage & ET	Beschreibung
UE	Eisen & Stahl	Kokerei Kohle	Produktion von Koks
UE	Eisen & Stahl	Hochofen Kohle und Koks	Reduktion des Eisenerzes

VSE (UEA)	Eisen & Stahl	Kraftwerk Kuppelgase	Stromerzeugung
NEV	Chemie	Reformer Erdgas	Zur Produktion von und Ammoniak und Harnstoff
NEV	Papier	Zellstoffanlage Biomasse	Zur Produktion von Zellstoff und Papier

Im Bundesland Oberösterreich weist der Eisen- und Stahlsektor, insbesondere durch die Voestalpine AG Linz, den größten Gesamtenergiebedarf – in Form von Kohle – auf. Über die Kokerei wird die eingesetzte Kohle zu Koks umgewandelt, der in weiterer Folge im Hochofen zur Reduktion des Eisenerzes, im Zuge der Primärstahlherstellung, dient. Der Großteil der so eingesetzten Kohle scheint nicht in der NEA auf, da sie nicht für endenergetische Zwecke, sondern während des Produktionsprozesses zur Reduktion des Eisenerzes eingesetzt wird. Der Sektor Chemie und Petrochemie umfasst Unternehmen wie z.B. Borealis Linz, die im Produktionsprozess Erdgas stofflich für die Herstellung von Produkten wie Ammoniak nutzen. Dabei wird aktuell hauptsächlich fossiles CH₄ verwendet, um H₂ über Dampfreformer zu erzeugen, welches für die Produktion von Ammoniak und Harnstoff benötigt wird [14]. Im Sektor Papier und Druck wird Biomasse für die Zellstoff- und Papierherstellung verwendet, wobei bedeutende Unternehmen wie Lenzing Papier GmbH, Laakirchen AG und Smurfit Kappa Nettingsdorf genannt werden können.

3.2 THG-Emissionen

Zusätzlich zur Ermittlung des Energiebedarfs ist es Ziel dieser Arbeit, die zugehörigen THG-Emissionen für jedes Szenario zu erfassen und darzustellen. Dazu ist es wichtig, die zuvor definierte Bilanzgrenze zu beachten. Ähnlich wie beim Energieverbrauch werden THG-Emissionen, die bei der Erzeugung von Energieträgern, wie z.B. Strom und Fernwärme, außerhalb der betrachteten Bilanzgrenze durch Energieversorgungsunternehmen entstehen, nicht berücksichtigt, da im Rahmen dieser Arbeit lediglich Scope 1 Emissionen (d.h. Emissionen, die direkt innerhalb der betrachteten Bilanzgrenzen entstehen) abgebildet werden [15]. Innerhalb der Bilanzgrenze entstehen klimawirksame THG-Emissionen durch die Verwendung bzw. den Verbrauch aller fossilen, kohlenstoffhaltigen Energieträger. Um den gesamten THG-Ausstoß zu ermitteln, werden spezifische CO₂e-Emissionsfaktoren [tCO₂e/GWh] verwendet. Diese werden mit dem Gesamtenergieverbrauch des jeweiligen Energieträgers multipliziert, um den gesamten THG-Ausstoß zu erhalten. Tabelle 3-5 bietet

eine Übersicht über die spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für jeden Energieträger. Darin sind die Energieträger in zusammengeführter Form aufgeführt, wie in Kapitel 3.1.3 diskutiert.

Um den spezifischen CO₂e-Emissionsfaktor für Kohle zu ermitteln, erfolgt die Bildung eines Mittelwerts der zum Einsatz kommenden Kohlearten. Ebenso wird ein Mittelwert für den Energieträger Öl (Benzin, Diesel, Heizöl etc., siehe Tabelle 3-2) berechnet. Bei kohle- und ölbasierten Energieträgern kann davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit dieser Vorgehensweise aufgrund der ähnlichen spezifischen CO₂e-Emissionsfaktoren je Energieträger ausreichend ist. Bei dem zusammengeführten Energieträger „Biomasse und Abfall“ ist der Unterschied der spezifischen CO₂e-Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger groß (siehe Tabelle 3-5). Je nach Sektor überwiegt der Anteil an biogenen Brenn- und Treibstoffen, Scheitholz oder Abfällen. Dadurch ist eine differenzierte Vorgehensweise bei der Emissionsfaktorberechnung für „Biomasse und Abfall“ erforderlich. Anhand der NEA werden die prozentualen Anteile von Scheitholz, Biogene Brenn- und Treibstoffe sowie Abfälle an „Biomasse und Abfall“ je Sektor im Basisjahr berechnet und anschließend mit den oben angeführten spezifischen Emissionsfaktoren multipliziert. Diese Methodik findet für den Energieträger „Biomasse und Abfall“ in allen Szenarien Anwendung.

Tabelle 3-5: Spezifische CO₂e-Emissionsfaktoren je Energieträger

Energieträger	Spezifische CO ₂ -Emissionsfaktoren [t CO ₂ e/GWh]	Quelle
Kohle	357,3	NEFI [16]
CH₄	199,4	NEFI [16]
Öl	270,0	NEFI [16]
Biomasse und Abfall:		
Scheitholz	6,0	UBA [17]
Biogene Brenn- und Treibstoffe	0,0	NEFI [16]
Abfälle	282,9	NEFI [16]
CH₄ od. H₂ (WAM-OÖ, SK)	Siehe Tabelle 3-6	NEFI [16]
Biomethan	6,0	UBA [17]

Der CO₂e-Emissionsfaktor für Gas ist über die aktuelle Gaszusammensetzung im Gasnetz definiert. Aktuell besteht die Gaszusammensetzung im Gasnetz aus reinem Erdgas, wobei der

spezifische CO₂e-Emissionsfaktor 199,4 tCO₂/GWh Gas beträgt. Im Szenario Trend bleibt dieser Wert konstant, da eine gleichbleibende Gaszusammensetzung angenommen wird. In den Szenarien WAM-OÖ und SK wird hingegen angenommen, dass sich die Gaszusammensetzung nach Tabelle 3-6 ändert, was Auswirkungen auf den spezifischen CO₂e-Emissionsfaktor hat. Diese Änderung der Gaszusammensetzung folgt einer Wirtschaftlichkeitsberechnung im Rahmen des NEFI-Projekts, bei der die steigenden CO₂-Kosten für fossiles Gas miteinbezogen werden und so ein Break-even-Point berechnet wird, ab dem nur mehr erneuerbares Gas eingesetzt wird. [16] Dieser Punkt liegt, wie der Tabelle 3-6 entnommen werden kann, zwischen den Jahren 2040 und 2045.

Tabelle 3-6: Spezifischer THG-Ausstoß für Gas im Szenario WAM-OÖ und SK, abhängig vom Betrachtungsjahr (nach NEFI [16])

Jahr	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
[tCO ₂ e/GWh Gas]	199,44	192,90	186,59	176,91	151,26	0	0

3.2.1 Prozessbedingte THG-Emissionen

Neben den energiebedingten THG-Emissionen, die bei der energetischen Nutzung der Energieträger entstehen, kommt es in der Eisen- und Stahlindustrie sowie der Zementindustrie zu erheblichen prozessbedingten THG-Emissionen [18] S. 8. Die prozessbedingten Emissionen korrelieren mit der Produktionsmenge, welche für die jeweiligen Unternehmen für das Jahr 2019 in Tabelle 3-8 dargestellt sind und aus dem Innovationsverbund New Energy for Industry (NEFI) stammen [16]. Da dem Szenario Trend die Annahme keiner Technologieänderungen im Industriebereich zugrunde liegt, erfolgt keine Änderung der prozessbedingten THG-Emissionen bis 2050. Die Umstellung der bisher etablierten Hochofenroute hin zur Direktreduktion mittels CH₄ in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen in der Eisen- und Stahlerzeugung, die im Szenario WAM-OÖ nach NEFI implementiert ist, verursacht ebenso eine Änderung der prozessbedingten Emissionen wie das Carbon-Capture (CC) – das Einfangen des CO₂-Ausstoßes, bevor es in die Atmosphäre emittiert wird – in der Zementindustrie. Details dazu werden in der Modellierung der einzelnen Energienachfrageszenarien erläutert.

3.3 Szenarienentwicklung

Unter Szenarienentwicklung ist allgemein die Erstellung eines Szenarios, ausgehend vom Basisjahr, über Stützjahre bis hin zum Ende des Betrachtungszeitraumes zu verstehen. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Energienachfrageszenarien keine Vorhersagen darstellen, sondern viel mehr mögliche Entwicklungswege aufzeigen, wie in Abbildung 3-1 illustriert. Diese Vorgehensweise wird bei der Erstellung von Energienachfrageszenarien häufig angewandt, unter anderem beim „Reference Scenario“ der europäischen Kommission [3] S. 8. Durch die verschiedenen Entwicklungswege besteht die Möglichkeit, die Auswirkungen diverser Faktoren zu quantifizieren, die Auswirkungen auf den Energiebedarf haben. In diesem Kapitel soll die Bedeutung einzelner Fortschreibungsfaktoren erläutert werden. Für das Erstellen von Energienachfrageszenarien sind sowohl wirtschaftliche Faktoren wie das Bruttoinlandsprodukt (BIP), demographische Faktoren wie das Bevölkerungswachstum, gesellschaftliche Faktoren wie die spezifische Flächennachfrage als auch effizienzsteigernde Maßnahmen wie Sanierungsraten, Technologieumstellungen etc. relevant, da sie den Energiebedarf einzelner Sektoren und Nutzenergiekategorien beeinflussen. Eine Übersicht der angewandten Fortschreibungsfaktoren für die Szenarien Trend und WAM-OÖ bietet Tabelle 3-7. Die Entwicklung des Szenarios SK basiert nicht auf Fortschreibungsfaktoren, sondern auf der Entwicklung des Szenarios Trend, indem die Endenergiebedarfe aus dem Szenario Trend von 2050 in Nutzenergien und -exergien umgerechnet werden. Details zu dieser Vorgehensweise folgen in Kapitel 3.6. Aus diesem Grund ist das Szenario SK in Tabelle 3-7 nicht angeführt. Die Angabe der Fortschreibungsfaktoren erfolgt als jährliche, prozentuale Änderungsrate. Die Fortschreibungsfaktoren können sowohl ein positives als auch ein negatives Vorzeichen und dementsprechend eine steigernde oder senkende Auswirkung auf den Energieverbrauch haben. Der Trend der letzten Jahre ergibt einen leicht steigenden Energieverbrauch, was sich auch im Szenario Trend widerspiegelt. Das bedeutet, dass Faktoren wie das Bevölkerungswachstum, die einen steigernden Einfluss auf den Energieverbrauch haben, den Einfluss der effizienzgewinnenden Faktoren – wie der Sanierungsrate - kompensieren bzw. leicht übersteigen. Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 4.

Tabelle 3-7: Entwicklungsfaktoren für Szenarien Trend und WAM-OÖ

Entwicklungsfaktor	Trend	Quelle	WAM-OÖ	Quelle
Bevölkerungswachstum	0,25%/a	ÖROK [19]	0,25%/a	ÖROK [19]

Spezifische Flächennachfrage	1%/a	AEA [20]	1%/a	AEA [20]
Sanierungsrate	-0,5%/a	eigene Annahme	-1.5%/a	AEA [21]
Verkehr	1%/a	Laut Trend	-0.33%/a	UBA [22]
Wirtschaftswachstum	1,2%/a	WIFO [23]	Bis 2040: 1,70% 2040-2050: 1,60%/a	NEFI [16]
Standmotoren	-0,25%/a	NEFI [16]	-0,25%/a	NEFI [16]
Beleuchtung/EDV	-0,16%/a	NEFI [16]	-0,16%/a	NEFI [16]
Thermisch Prozesswärme	-0,49%/a	NEFI [16]	-0,49%/a	NEFI [16]

Die Zuweisung der Fortschreibungsfaktoren zu den einzelnen Sektoren und Nutzenergiekategorien erfolgt nach der Gewichtung der jeweiligen Auswirkung des Faktors auf den Energiebedarf. Beispielsweise hat der Faktor „Bevölkerungswachstum“ Einfluss auf die Nutzenergiekategorie „Raumklima und Warmwasser“ im Sektor „Private Haushalte“. Weiters ist für dieses Beispiel die „Sanierungsrate“ sowie die „spezifische Flächennachfrage“ relevant. Allgemein formuliert ergibt die Fortschreibung des Energieverbrauchs des Vorjahres ($EV_{J-1,S,NEK}$) nach der Formel (3-1) den Energieverbrauch ($EV_{J,S,NEK}$) für das betrachtete Jahr (J), den betrachteten Sektor (S) und die betrachtete Nutzenergiekategorie (NEK). Dabei werden alle Fortschreibungsfaktoren (i), die dem betrachteten Sektor und der betrachteten Nutzenergiekategorie zugewiesen sind, aufsummiert und mit dem Energieverbrauch des Vorjahres ($EV_{J-1,S,NEK}$) multipliziert.

$$EV_{J,S,NEK} = EV_{J-1,S,NEK} * (1 + \sum_i Faktor_i) \quad (3-1)$$

3.3.1 Wirtschaftliche Annahmen

Für den zukünftigen Energiebedarf aller Sektoren, aber insbesondere der Industriesektoren, ist die langfristige Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) essenziell. Daher findet das BIP als Entwicklungsfaktor in der Erstellungsmethodik der Energienachfrageszenarien für Oberösterreich Anwendung. Diese Vorgehensweise ist auch in anderen Dekarbonisierungsszenarien üblich (NEFI [16] S. 14, AEA – Erneuerbares Gas in Ö. 2040 [13] S. 24, EU-reference scenario [24] S. 29). Zur Abschätzung der Wirtschaftsentwicklung dient die WIFO-Mittelfristprognose vom September 2019, die in der langfristigen Budgetprognose des Bundesministeriums für Finanzen angeführt ist. „Das reale Wirtschaftswachstum wird dabei im Wesentlichen von den langfristigen demografischen Trends, welche das Arbeitsangebot determinieren, der Entwicklung des Kapitalstocks und dem technologischen Fortschritt bestimmt. Für die Periode 2020 bis 2060 wird das reale Wirtschaftswachstum aufgrund des schwach wachsenden Arbeitskräfteangebots auf rund 1,2% pro Jahr geschätzt.“ [23] S. 12

3.3.2 Demographische Annahmen

Demographische Entwicklungen, wie das jährliche Bevölkerungswachstum, werden, gleich wie das Wirtschaftswachstum, häufig in der Szenarienerstellung implementiert (AEA - Erneuerbares Gas in Ö. 2040 [13] S. 24, EU-reference scenario [24] S. 27). Das Bevölkerungswachstum hat Einfluss auf den Energiebedarf, vor allem jener Sektoren, bei denen die Bevölkerungsanzahl mit dem Energiebedarf korreliert. Dies ist besonders in den Gebäudesektoren „Private Haushalte“ und „Dienstleistungen“ der Fall, aber auch im PKW- und LKW-Verkehr, der durch den Sektor „Sonstiger Landverkehr“ in der NEA abgebildet ist, bewirkt das Bevölkerungswachstum eine Änderung des Energiebedarfs. Zur Abschätzung des Bevölkerungswachstums fungiert die Bevölkerungsprognose der Österreichischen Raumordnungskonferenz 2018 (ÖROG 2018) [19]. Für Oberösterreich ergibt sich aus diesen Daten im Zeitraum von 2019 bis 2050 eine durchschnittliche Bevölkerungswachstumsrate von 0,25% pro Jahr.

3.3.3 Weitere Annahmen

Die Sanierungsrate hat, ähnlich wie das Bevölkerungswachstum, Einfluss auf den Energiebedarf der Gebäudesektoren, insbesondere im Sektor „Private Haushalte“. Im Gegensatz zum Bevölkerungswachstum, das alle Nutzenergiekategorien prägt, bewirkt die Sanierungsrate ausschließlich für die Nutzenergiekategorie „Raumklima & Warmwasser“ eine Änderung im Energiebedarf. Für das Szenario Trend wird pauschal eine Sanierungsrate von

0,5%/a angenommen, um die aktuellen Entwicklungen im Bereich Sanierungen und Vollwärmeschutz zu berücksichtigen. Im Szenario WAM-OÖ gilt die Annahme einer ambitionierteren Sanierungsrate von 1,5%. Als Quelle dafür dient die „Langfristige Renovierungsstrategie“ des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB Richtlinie 6) [25] S. 24.

Durch die Berücksichtigung der Änderungsrate der spezifischen Flächennachfrage kann die Tatsache der steigenden benötigten Wohnfläche pro Person abgebildet werden. Besonders in der Nutzenergiekategorie „Raumklima & Warmwasser“ gilt es, diesen Faktor zu berücksichtigen. Im Zuge des Berichts „Entwicklung des Raumwärmebedarfs in Österreich“ der AEA wird eine jährliche Steigerung von 1% für die spezifische Flächennachfrage definiert und im Rahmen dieser Arbeit übernommen [20].

3.4 Modellierung Szenario Trend

Das Szenario Trend basiert auf der Fortschreibung historischer Trends und Prognosen wirtschaftlicher und demographischer Entwicklungen in den Energiebilanzen. Zusätzlich werden eigene Annahmen für effizienzsteigernde Maßnahmen und Sanierungsraten getroffen (siehe die bereits oben beschriebene Tabelle 3-7), die den historischen Trend widerspiegeln. Das Szenario Trend dient als Referenzszenario und ermöglicht, die Wirksamkeit politischer Rahmenbedingungen, Technologieumstellungen, Effizienzsteigerungen und sektorgekoppelter Maßnahmen, die im Szenario WAM-OÖ und SK implementiert werden, zu analysieren und zu bewerten. Im Szenario Trend wird der Energieverbrauch je Nutzenergiekategorie anhand von Entwicklungsfaktoren aus Tabelle 3-7 und der Formel (3-1) bis 2050 fortgeschrieben. Zusätzlich zur Fortschreibung des Gesamtenergieverbrauchs soll die Aufteilung dieser Menge auf die einzelnen Energieträger durchgeführt werden, um Verschiebungen der Anteile an eingesetzten Energieträgern (fuel-switch) erkennen zu können. Dafür werden die Änderungsraten jedes Energieträgers über die letzten Jahre herangezogen. Zur Ermittlung der Änderungsraten erfolgt eine Betrachtung der Nutzenergieanalysen der Jahre 2015 bis 2019. Ziel dabei ist es, eine den historischen Trend reflektierende Änderungsrate je Energieträger ableiten und dadurch fuel-switches abbilden zu können. Im Szenario Trend werden im Gegensatz zum Szenario WAM-OÖ keine über den Trend hinausgehenden Technologieänderungen in der Industrie angenommen. Auch politische Vorgaben wie der Ausstieg aus Ölkesseln im häuslichen Bereich werden im Szenario Trend nicht berücksichtigt. Eine genauere Diskussion zu den Ergebnissen erfolgt in Kapitel 4.

3.5 Modellierung Szenario WAM-OÖ

Das Szenario WAM-OÖ soll den Einfluss geplanter politischer, ökonomischer, demographischer und technologischer Rahmenbedingungen und Ziele auf den Energiebedarf in verschiedenen Sektoren quantifizieren. Diese Maßnahmen beinhalten unter anderem die Steigerung der Sanierungsrate und Energieeffizienz in Gebäudesektoren, die Umstellung von Technologien in Industriesektoren sowie die Elektrifizierung im Transportsektor. Im Folgenden erfolgt eine detaillierte Beschreibung dieser Maßnahmen sowie der Vorgehensweise (Fortschreibung, Annahmen) innerhalb der einzelnen Hauptsektoren.

3.5.1 Industriesektoren

Zur Fortschreibung der Industrie wird der im Szenario Trend angewandte Top-down-Ansatz zur Berechnung des Energiebedarfs um eine Bottom-up Betrachtung erweitert. Die Erweiterung des Top-down-Ansatzes um eine Bottom-up Betrachtung energieintensiver, industrieller Unternehmen findet auch in der Erstellung der NEFI-Szenarien Anwendung. Die Kombination dieser Methodiken ermöglicht es, Technologieeinführungen und -umstellungen und damit einhergehende Änderungen des THG-Ausstoßes in den Teilsektoren realitätsgetreuer zu berücksichtigen [16]. Der Top-down Ansatz zur Berechnung des Energiebedarfs der Industriesektoren orientiert sich am Szenario „Pathway of Industry“ (POI) der Forschungsinitiative NEFI – New Energy for Industry. Das Szenario POI wurde in Zusammenarbeit mit Vertretern großer Unternehmen in jedem Teilsektor der Industrie erstellt, wodurch die Abbildung der tatsächlich geplanten Veränderungen in den Industriesektoren und den damit einhergehenden Veränderungen im Energieverbrauch ermöglicht wird [16]. Das Szenario POI umfasst die Daten der Industriesektoren für ganz Österreich. Um den Energiebedarf für Österreich je Industriesektor auf den Energiebedarf für Oberösterreich umzulegen, dient der Anteil der Endenergienachfrage in Oberösterreich an jener von Österreich. Die Berechnung dieses Anteils geschieht für jeden Sektor und auch für jeden Energieträger, da nicht jeder Energieträger innerhalb eines Sektors den gleichen Anteil am Endenergieverbrauch Österreichs hat. Als Beispiel erfolgt eine Betrachtung des Energieträgers „Öl“ im Sektor „Chemie und Petrochemie“. Der Ölbedarf in Oberösterreich deckt nur einen Anteil von 17% des österreichweiten Ölbedarfs dieses Sektors. Im Durchschnitt beträgt der Anteil Oberösterreichs an Österreich allerdings 42,8% im Sektor „Chemie- und Petrochemie“, was auf unterschiedliche Produktionserzeugnisse der Chemieunternehmen zurückzuführen ist [16]. Anschließend wird der Bedarf jedes Energieträgers aus dem Szenario POI mit dem zugehörigen Faktor multipliziert, um den Energiebedarf Oberösterreichs zu erhalten. Um die Genauigkeit der Szenarientwicklung im

Industriebereich zu erhöhen, erfolgt eine Bottom-up Betrachtung großer Unternehmen aus den Bereichen Eisen- und Stahlindustrie, Papierindustrie sowie Zement- und Chemieindustrie. Die zahlreichen Bottom-up betrachteten Unternehmen und deren Jahresproduktionsmengen an Primärstahl, Papier und Zellstoff sowie Klinker und Ammoniak sind in Tabelle 3-8 dargestellt. Die Produktionsmengen gelten für das Basisjahr 2019 und werden über den Betrachtungszeitraum nach dem Vorbild des Szenarios POI als konstant angenommen [16].

Tabelle 3-8: Bottom-up betrachtete Unternehmen und deren Produktionsmengen [16]

Industrie	Unternehmen	Produktionsmenge [kt/a]
Eisen- und Stahlindustrie	Voestalpine AG Linz	5100
Papierindustrie	Laakirchen Papier AG	730
Papierindustrie	Lenzing AG	400
Papierindustrie	Smurfit Kappa Nettingsdorf	450
Papierindustrie	UPM-Kymmene Austria GmbH	270
Zementindustrie	Zementwerk Hatschek GmbH	413
Zementindustrie	Kirchdorfer Zementwerk GmbH	258
Chemieindustrie	Borealis Linz	553

Durch die angenommenen Technologieänderungen gestalten sich jedoch sowohl der spezifische Energiebedarf je Tonne Produkt als auch die dazugehörigen THG-Emissionen anders als im Basisjahr 2019. Einerseits erfolgt in der Eisen- und Stahlerzeugung, durch das Unternehmen Voestalpine AG in Linz, die stufenweise Umstellung der bisher etablierten Hochofenroute hin zur Direktreduktion durch CH₄ in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen, andererseits wird in der CO₂-intensiven Zementindustrie ab 2025 Carbon-Capture implementiert. Die Carbon-Capture Raten in der Zementindustrie sind in Tabelle 3-9 ersichtlich. In der Zementindustrie wird von einem steigenden Anteil des behandelten CO₂-Ausstoßes ausgegangen, während der Anteil des davon eingefangenen CO₂s, aufgrund der technischen Möglichkeiten [16], konstant bei 90% liegt.

Tabelle 3-9: Carbon-Capture Raten in der Zementindustrie [16]

Zementindustrie	2030	2035	2040	2050
Anteil des behandelten CO₂-Ausstoßes	30%	50%	70%	100%
Anteil davon, der auch eingefangen wird	90%	90%	90%	90%
Anteil des eingefangenen CO₂ am Gesamtausstoß	27%	45%	63%	90%

Die Voestalpine AG hat für Linz mit dem Projekt „greentec steel“ einen ambitionierten Stufenplan für emissionsärmere Stahlproduktion entwickelt. Dieser Plan sieht vor, bis 2050 Klimaneutralität in der Stahlproduktion zu erreichen [26]. Im Szenario WAM-OÖ wird der bis 2030 konkretisierte Stufenplan verfolgt. In den Folgejahren orientiert sich die Prozessumstellung am Szenario POI [16], in dem bis 2040 alle drei traditionellen Hochöfen in Linz durch die Natural Gas-Direct Reduction / Electric Arc Furnance (NG-DR/EAF) Route ersetzt werden sollen. (siehe Abbildung 3-4). Im Jahr 2027 soll die Umstellung des ersten Hochofens mit einer Produktionskapazität von ca. 1 Mt/a in Linz auf EAF erfolgen, bis spätestens 2035 soll der zweite Hochofen derselben Kapazität umgestellt werden. Ein wesentlicher Unterschied bis 2030 zwischen dem Szenario POI und dem greentec steel Programm besteht darin, dass das für den EAF benötigte Hot-Briquetted-Iron (HBI, Eisenschwamm) über einen Liefervertrag aus Texas importiert wird. Im Szenario POI wird hingegen noch von einer Direktreduktionsanlage direkt am Standort in Linz ab 2027 ausgegangen. Für das Szenario WAM-OÖ erfolgt die Direktreduktion daher erst ab 2035 in Linz. Der letzte Schritt des Szenarios POI sieht für Linz die Umstellung des dritten, großen Hochofens mit Produktionskapazität von ca. 3,1 Mt/a auf die NG-DR/EAF Route bis 2040 vor [16].

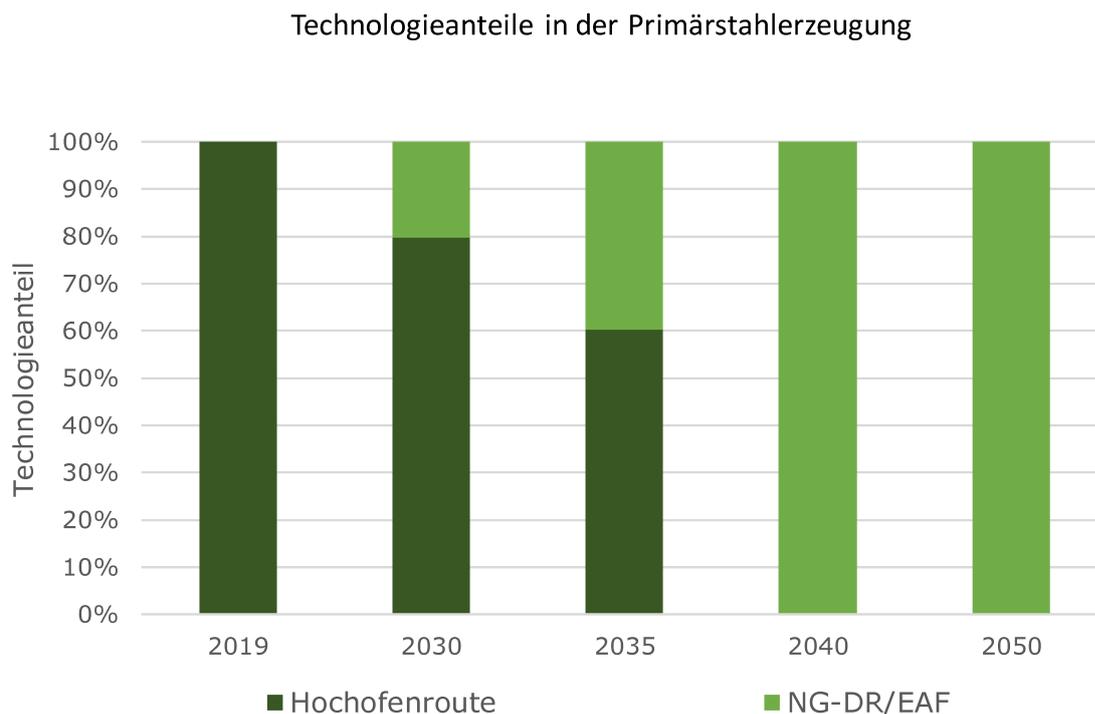


Abbildung 3-4: Technologieumstellung der Voestalpine AG in Linz zur Primärstahlerzeugung (in Anlehnung an das Szenario POI und den Dekarbonisierungsplan greentec steel [16, 26])

3.5.2 Gebäudesektoren

Grundsätzlich findet auch im Szenario WAM-OÖ für die Gebäudesektoren die in Kapitel 3.4 erläuterte Szenarientwicklung mithilfe von Fortschreibungsfaktoren Anwendung. Der Unterschied zum Szenario Trend besteht in der Implementierung politischer Vorgaben und Rahmenbedingungen, sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene, zur Deckung des Energiebedarfs der Nutzenergiekategorie Raumwärme. Auf Bundesebene – im Rahmen des Regierungsprogramms – beinhalten die Vorgaben für öl- und kohlebasierten Heizkessel folgende Punkte, die im Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWG), zu dem eine Regierungsvorlage aufliegt, verankert sind [27]:

- Verbot im Neubau ab 2020
- Ab 2023 dürfen kaputte Öl- und Kohleheizungen nur mehr durch klimafreundliche Heizsysteme ersetzt werden
- Verpflichtender Austausch von Kesseln, die älter als Baujahr 1980 sind (ab 2025)
- Austausch aller öl- und kohlebasierten Kesseln bis zum Jahr 2035 (Phase-Out von Öl und Kohle zur Deckung des Raumwärmebedarfs)

Neben dem EWG ist auch das Ölkesselinbauverbotsgesetz (ÖKEVG 2019) von Relevanz, in welchem das Aufstellen und der Einbau von Heizkesseln von Zentralheizungsanlagen für

flüssige fossile oder feste fossile Brennstoffe in neu errichteten Gebäuden für unzulässig erklärt wird [28].

Weiters gelten auf Landesebene für Oberösterreich Bestrebungen zum Phase-Out von fossilem Gas in der Raumwärme bis 2040 [21]. Daraus folgt ein fuel-switch, weg von den fossilen Energieträgern Öl, Kohle und Gas in der Raumwärmeversorgung, hin zu steigendem Strom- und Umgebungwärmebedarf durch Wärmepumpen, sowie Fernwärme und Solarthermie. Außerdem wird durch eine Sanierungsrate von 1,5%/a im Gebäudesektor ein Ansatz der Szenarientwicklung verfolgt, der in einer Einsparung der Nutzenergie resultiert.

3.5.3 Transportsektoren

Der Energiebedarf der Transportsektoren wird maßgeblich vom Sektor „Sonstiger Landverkehr“ bestimmt, dem der gesamte Energiebedarf von PKWs und LKWs zugerechnet wird. Im Szenario WAM des UBA für Österreich erfährt der Endenergieverbrauch des Verkehrs durchschnittlich eine jährliche Abnahme von 0,33% bis 2050 [22]. Dieser Faktor wird für die Fortschreibung des Gesamtenergieverbrauchs der Transportsektoren im Szenario WAM-OÖ übernommen. Zusätzlich orientiert sich die prozentuale Aufteilung der Energieträger am Endenergieverbrauch innerhalb des Sektors „sonstiger Landverkehr“ am Szenario WAM für Österreich, die für 2050 in Tabelle 3-10 dargestellt ist.

Tabelle 3-10: Anteile der Energieträger am Gesamtenergieverbrauch 2050 für den Sektor „sonstiger Landverkehr“ [22]

Energieträger	Anteil am Endenergieverbrauch 2050
Öl	75,0%
Gas	2,5%
Biogene Treibstoffe	8,5%
Wasserstoff	0,2%
Strom	13,8%

3.6 Modellierung Szenario Sektorkopplung

Im Szenario Sektorkopplung erfolgt eine exergiebasierte Betrachtung der in Oberösterreich nachgefragten Nutzenergiemenge aus dem Szenario Trend für 2050. Um die im folgenden Abschnitt beschriebene Methodik besser zu verstehen, dient Abbildung 3-5, die die Vorgehensweise für das Szenario Sektorkopplung zusammenfassend darstellt. Bis 2050 soll – im Rahmen des Szenarios SK – der Ausstieg aus fossilen Energieträgern sowie eine exergieoptimierte Versorgung der verschiedenen Warmwasser-, Raum- und Prozesswärmebedarfe realisiert werden. Die Nutzenergiemengen werden über die Endenergiemengen des Szenarios Trend, je Sektor und NEK für das Jahr 2050, mithilfe von mittleren Technologieeffizienzen (siehe Tabelle 7-2) ermittelt. Anschließend werden diese Nutzenergien mithilfe von Exergiefaktoren auf Nutzexergien umgerechnet. Für die Exergiefaktoren gilt es, die Art der Nutzenergie (thermisch, mechanisch oder elektrisch) zu unterscheiden. Für mechanische und elektrische Nutzenergiebedarfe gilt der Exergiefaktor 1, für thermische Nutzenergiebedarfe ist das Temperaturniveau der bereitzustellenden Nutzenergie für den Exergieinhalt entscheidend [6]. Der Carnot-Wirkungsgrad η_C (Formel (3-2)) bestimmt dabei, wie hoch der Anteil der Nutzexergie an der Nutzenergie ist. T_U entspricht der Umgebungstemperatur in Kelvin, T_N dem bereitzustellenden Temperaturniveau in Kelvin [6].

$$\eta_C = \left[1 - \left(\frac{T_U}{T_N} \right) \right] \quad T_U = 283,15 \text{ K} \triangleq 10^\circ\text{C} \quad (3-2)$$

Je höher das Temperaturniveau der bereitzustellenden Energie ist, desto größer ist der Carnotfaktor und dementsprechend der Exergieanteil an der thermischen Nutzenergie. Der Zusammenhang der thermischen Nutzenergie N_{EN} mit der Nutzexergie N_{EX} ist über den Carnot-Wirkungsgrad laut Formel (3-3) gegeben:

$$N_{EX} = N_{EN} * \eta_C \quad (3-3)$$

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, sind Prozessenergiebedarfe nicht in der NEA enthalten. Um nicht nur den Endenergiebedarf, sondern den gesamten Energiebedarf Oberösterreichs innerhalb der betrachteten Bilanzgrenzen (siehe Abbildung 3-3). Im Szenario SK abzubilden, wird neben der Berechnung der Nutzexergien, der Prozessenergiebedarf für die industriellen Verbraucher in der Eisen- und Stahlindustrie, Chemie- und Papierindustrie sowie die CO₂-Sequestration in der Zementindustrie berücksichtigt. Mittels linearer Optimierung, die den Ausführungen nach Sejkora et al. 2022 [6] entspricht, werden die Energiemengen für 2050 für das Szenario SK ermittelt. Dabei kommt eine Modellierungsumgebung zum Einsatz, die sowohl die Energienachfrage als auch die Energieaufbringung in die Berechnungen miteinbezieht. Für beides existieren stündlich

aufgelöste Zeitreihen, sodass der Optimierer den technologisch effizientesten Nachfragefall (Kombination an Endenergie-technologien) in den Nachfragesektoren ermittelt, bei dem der Primärenergiebedarf Österreichs, über das gesamte Jahr gerechnet, den Minimalwert erreicht.

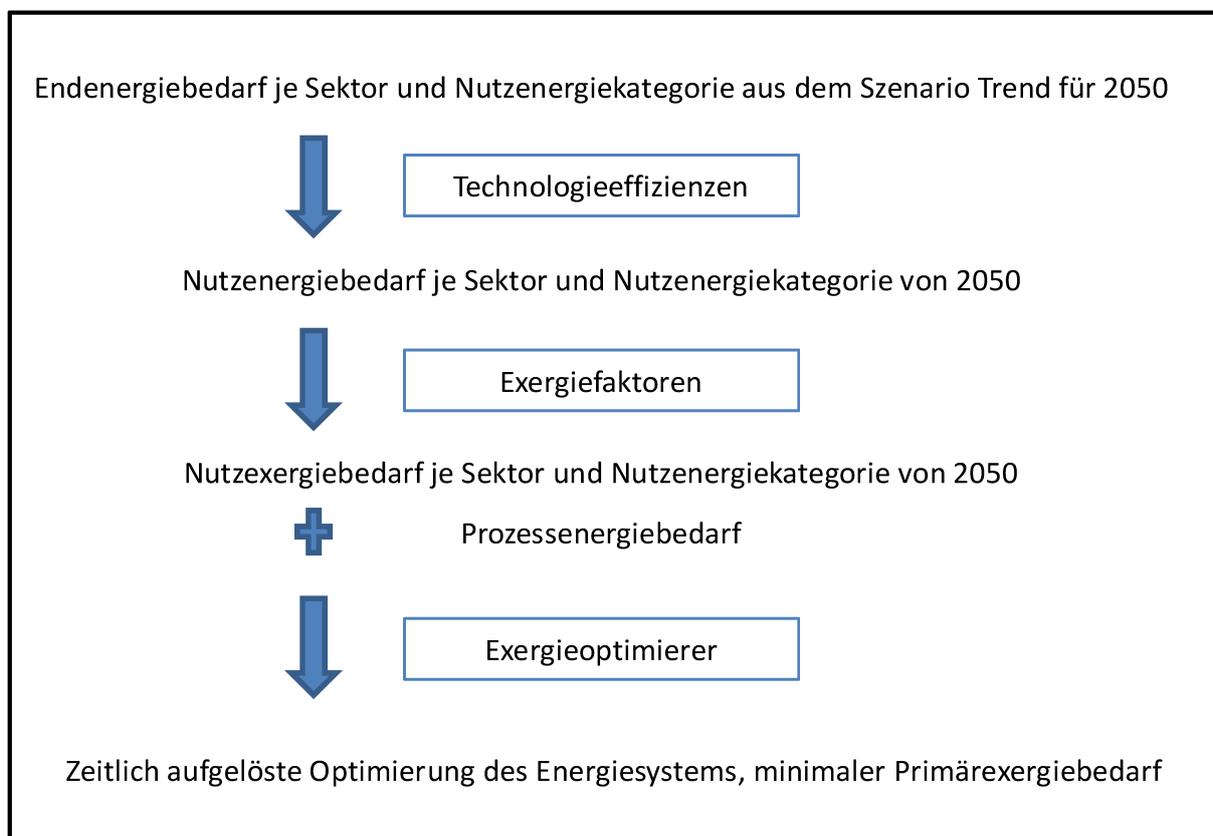


Abbildung 3-5: Der Weg vom Endenergiebedarf Szenario 2050 bis hin zum minimalen Primärenergiebedarf für das Szenario SK 2050

3.6.1 Entwicklung Sektorkopplung

Um die Gesamtenergiemengen für das Szenario SK zu erstellen, werden zunächst die für den optimierten Fall berechneten Exergiemengen je Sektor und Nutzenergiekategorie für 2050 zurück in Endenergiemengen gerechnet. Im nächsten Schritt erfolgt die lineare Einschleifung der Energiewerte des Zielbildes aus dem Szenario SK für 2050 in das bereits bestehende Szenario Trend. Um der Linearität dieser Einschleifung gerecht zu werden, werden die Energiebedarfe auf den Betrachtungszeitraum (2019 bis 2050) nach Tabelle 3-11 aufgeteilt. Das Ausgangsjahr 2019 basiert zu 100% auf dem Szenario Trend, das Endjahr 2050 zu 100% auf dem Szenario SK. Die Faktoren zur Berechnung der Energiemenge für das jeweilige, dazwischenliegende Stützjahr werden durch lineare Interpolation ermittelt, wobei die Summe der Anteile der beiden Szenarien für jedes Jahr 100% ergibt.

Tabelle 3-11: Faktoren zur Erstellung des Szenarios SK: Einschleifung des Szenarios SK in das Szenario Trend

Jahr	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anteil Trend	100%	83%	67%	50%	33%	17%	0%
Anteil SK	0%	17%	33%	50%	67%	83%	100%

Der Energiebedarf je Energieträger (I) und Jahr (J) für das Szenario SK ($E_{SK,J,I}$) ergibt sich somit über den Anteil aus dem Szenario SK ($A_{SK,J,I}$) und den Anteil aus dem Szenario Trend ($A_{T,J,I}$), multipliziert mit der jeweiligen Energiemenge aus den Szenarien ($E_{SK,2050,I}$ und $E_{T,J,I}$), nach Formel (3-4).

$$E_{SK,J,I} = A_{T,J,I} * E_{T,J,I} + A_{SK,J,I} * E_{SK,2050,I} \quad (3-4)$$

Die THG-Emissionen für das Szenario SK werden, ebenso wie die Energiebedarfsmengen, in das Szenario Trend nach den Faktoren aus Tabelle 3-11 eingeschliffen.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER SZENARIEN

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der drei Nachfrageszenarien einzeln dargestellt und beschrieben werden. Danach erfolgt in Kapitel 4.4 eine Diskussion und Gegenüberstellung der Szenarien, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Methodiken in der Erstellung der Szenarien zu visualisieren und zu erklären. Das Basisjahr 2019 ist für jedes der drei Szenarien dasselbe, insbesondere erfolgt eine Betrachtung der Stützjahre 2030, 2035, 2040 sowie das Ende des Szenarienzeitraumes 2050. Zur besseren Nachvollziehbarkeit durch Visualisierung der Ergebnisse, werden im Folgenden Diagramme verwendet, die auf der Primärachse den Energiebedarf in GWh/a und auf der Sekundärachse den THG-Ausstoß in MtCO₂e/a zeigen. Ziel dabei ist es, sowohl die Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs nach Energieträgern, sich daraus ergebende fuel-switches und phase-outs, als auch die zugehörigen THG-Emissionen darzustellen und zu plausibilisieren.

4.1 Ergebnisse Trend

Das Szenario Trend soll die Fortführung der historischen Entwicklung des Energieverbrauchs und des damit zusammenhängenden THG-Ausstoßes in Oberösterreich darstellen. Abbildung 4-1 zeigt den Verlauf des Gesamtenergiebedarfs sowie der THG-Emissionen für das Szenario Trend über die Stützjahre bis 2050, wobei der Gesamtenergiebedarf um 18,3 TWh von 88,7 TWh im Jahr 2019 auf 107 TWh im Jahr 2050 steigt. Bei einer detaillierten Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs nach Energieträgern wird deutlich, dass der Bedarf jedes Energieträgers ansteigt. Den größten absoluten Anstieg verzeichnet der Energieträger Öl mit einem Zuwachs um ca. 6,2 TWh auf 27,2 TWh, was auf den gestiegenen Energieverbrauch in den Transportsektoren zurückzuführen ist. Ebenso verzeichnet der Gasverbrauch einen Anstieg um ca. 4,5 TWh auf 20,4 TWh sowie der Stromverbrauch einen Anstieg um 3,3 TWh auf 17,9 TWh. Der in Abbildung 4-1 dargestellte Energieträger „CH₄ od. H₂“ repräsentiert die Zusammensetzung des Gases im Gasnetz, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Im Szenario Trend besteht die Besonderheit, dass die Zusammensetzung des Gases im Netz als gleichbleibend (fossiles CH₄) angenommen wird (siehe Kapitel 3.2), wodurch in Abbildung 4-1 die Balken der Gasanteile nicht schraffiert sind wie in den Diagrammen der anderen Szenarien.

Die THG-Emissionen im Szenario Trend erfahren aufgrund des steigenden Energiebedarfs und dem Einsatz fossiler Technologien laut historischer Entwicklung, sowie der Annahme der konstanten Gaszusammensetzung des Gases im Netz einen Zuwachs um 2,6 MtCO₂e von 18 MtCO₂e auf 20,6 MtCO₂e. Dieser Anstieg ist ausschließlich auf energiebedingte THG-Emissionen zurückzuführen, da die prozessbedingten THG-Emissionen in der Höhe von

8,1MtCO₂e aufgrund der konstant angenommenen Produktionsmengen über den Betrachtungszeitraum gleichbleibend sind.

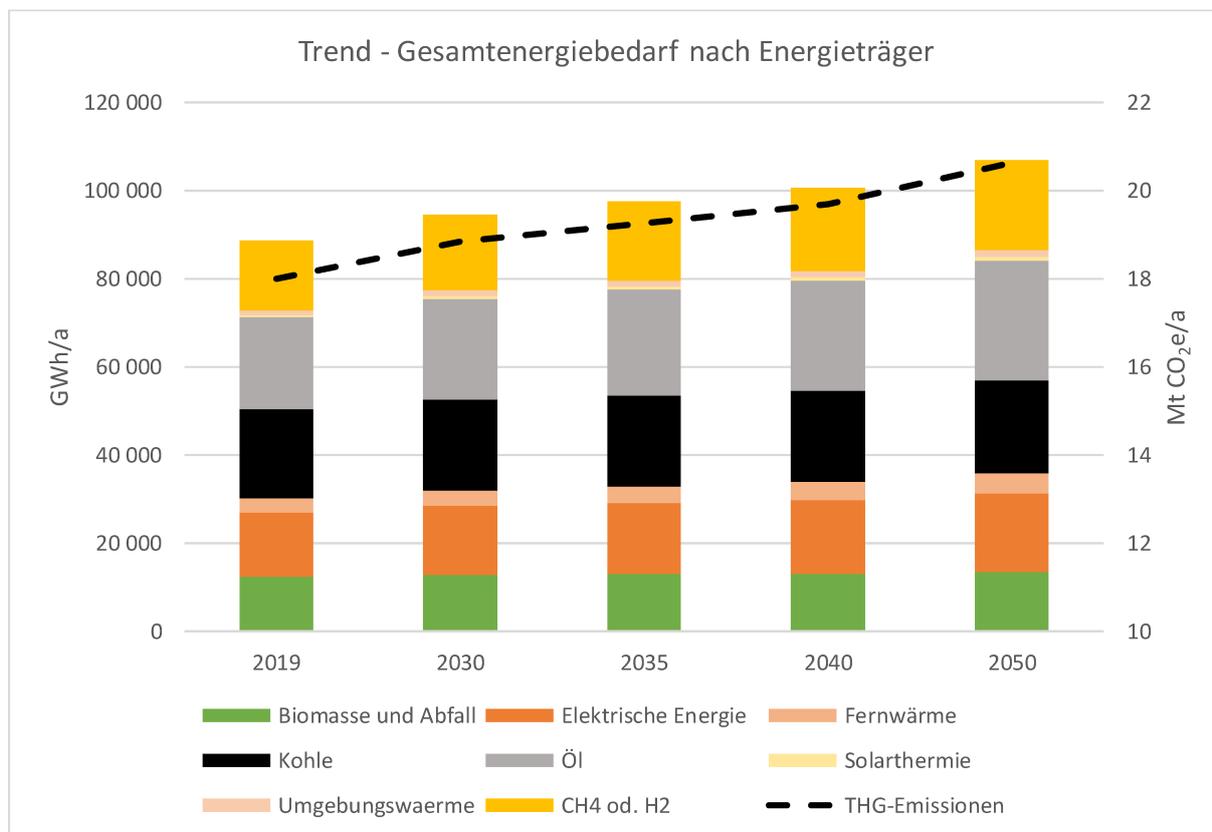


Abbildung 4-1: Gesamtenergiebedarf nach Energieträgern – Trend

Abbildung 4-2 stellt den Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren Transport, Gebäude und Industrie dar, wobei der Industriebereich den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf in Oberösterreich hat. Der Gesamtenergiebedarf aller Hauptsektoren ist steigend, die Industrie ist durch das Wirtschaftswachstum getrieben und verzeichnet dabei den größten Anstieg um 7,7TWh auf 57,1 TWh. Der Verkehr steigt um 7 TWh auf 26,5 TWh ähnlich stark an, wobei das Bevölkerungswachstum einen Grund für den Anstieg darstellt. Am geringsten ist der Anstieg im Gebäudebereich um 3,5TWh auf 23,4TWh, da dort der Einfluss des Bevölkerungswachstums und der steigenden spezifischen Flächennachfrage von Faktoren wie der Sanierungsrate oder effizienteren Standmotoren (Haushaltsgeräte) gedämpft wird. Innerhalb der Industrie gilt es, den Sektor Eisen- und Stahlerzeugung hervorzuheben, der 2019 mit 23,4TWh fast die Hälfte des industriellen Energieverbrauchs von 49,4TWh verursacht. 2050 sind im Szenario Trend 24,8 TWh der insgesamt 57,1 TWh der Industrie auf den Eisen- und Stahlsektor zurückzuführen. Der prozentuale Anteil des Eisen- und Stahlsektors nimmt dementsprechend von 47,3 % im Jahr 2019 auf 43,4 % im Jahr 2050 ab, was auf die Annahme der gleichbleibenden Produktionsmenge und damit den konstanten Umwandlungseinsatz von

Kohle zurückzuführen ist. Im Gebäudesektor ist – im Gegensatz zum steigenden Gasverbrauch um 1,1TWh – bereits im Szenario Trend ein Rückgang des Kohle- und vor allem Ölverbrauchs, der von 2,6TWh auf 1,2TWh bis 2050 sinkt, zu erkennen. Bei den Transportsektoren ist im Szenario Trend, über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg, weiterhin der Ölverbrauch dominant - 2019 betrug der Anteil des Ölverbrauchs am Gesamtverbrauch ca. 90,5%.

Die THG-Emissionen steigen für die Industrie- und Transportsektoren an, wobei der Anstieg in der Industrie mit 0,8MtCO₂e geringer ausfällt als der Anstieg in den Transportsektoren (2MtCO₂e). Dies kann trotz des insgesamt stärker steigenden Energieverbrauchs der Industrie dadurch begründet werden, dass innerhalb der Industrie Energieträger wie Strom und Fernwärme, die aufgrund der verwendeten Bilanzgrenze (siehe Abbildung 3-3) keine direkten THG-Emissionen verursachen, stärker ansteigen als in den Transportsektoren. Innerhalb der Gebäudesektoren sinken die THG-Emissionen. Grund dafür ist die vorhin erwähnte Abnahme des Ölverbrauchs innerhalb der Gebäudesektoren, die sich auch im leichten Rückgang der energiebedingten THG-Emissionen bei den Gebäuden um ca. 0,1MtCO₂e auf 1,3MtCO₂e widerspiegelt.

Die prozessbedingten THG-Emissionen der Eisen- und Stahlerzeugung und Zementindustrie (im Sektor Steine und Erden, Glas enthalten) ergeben zusammen 8,1 MtCO₂e. Davon ist der Großteil von 7,7MtCO₂e der Eisen- und Stahlindustrie und 0,4MtCO₂e der Zementindustrie zuzurechnen. Die prozessbedingten THG-Emissionen der Eisen- und Stahlindustrie verursachen somit mehr als ein Drittel der gesamten THG-Emissionen für das Bundesland Oberösterreich (Im Jahr 2020 waren es 21,6MtCO₂e für OÖ, im Jahr 2018 21,5MtCO₂e) [29, 30].

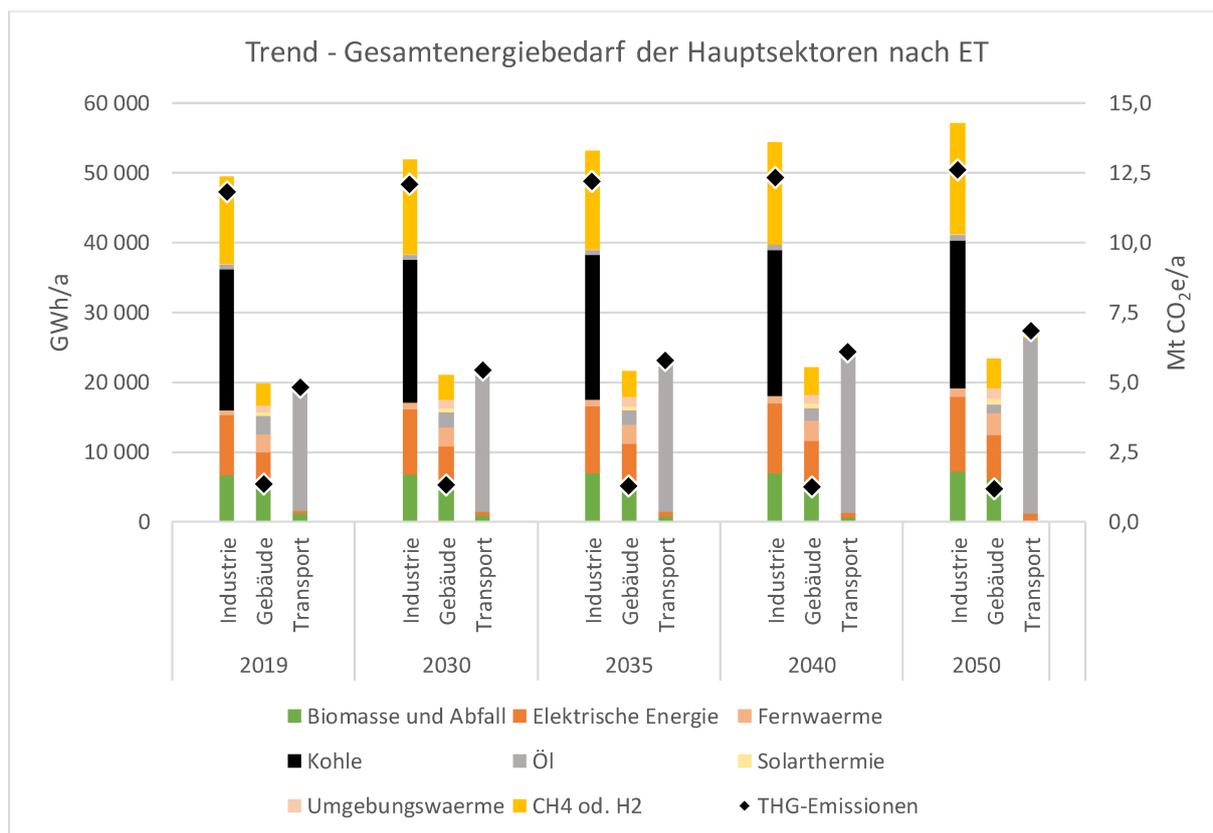


Abbildung 4-2: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – Trend

4.2 Ergebnisse WAM-OÖ

Das Szenario WAM-OÖ zielt darauf ab, den Einfluss geplanter politischer, ökonomischer, demographischer und technologischer Rahmenbedingungen auf den Energiebedarf sowie auf den THG-Ausstoß in verschiedenen Sektoren zu quantifizieren. Abbildung 4-3 visualisiert den Verlauf des Gesamtenergieverbrauchs und der THG-Emissionen über den Betrachtungszeitraum bis 2050. Im Ausgangsjahr 2019 beträgt der Gesamtenergieverbrauch 88,75TWh und steigt bis 2050 um 3,3TWh auf 92,05TWh an. Dabei ist der Gesamtenergieverbrauch nicht linear steigend, sondern aufgrund von Technologieänderungen in der Industrie schwankend. Besonders auffällig an Abbildung 4-3 ist das Phase-out der Kohle bis 2040, was hauptsächlich durch Änderungen im industriellen Bereich, insbesondere in der Eisen- und Stahlerzeugung, erklärt werden kann. Dies wird anhand von Abbildung 4-4 deutlich und im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch näher erläutert. Im Szenario WAM-OÖ steigt die Summe der gasförmigen Energieträger H₂, CH₄ und CH₄ od. H₂ in Abbildung 4-3 über den Betrachtungszeitraum von 15,9TWh auf 30,8TWh nahezu um das Doppelte an. Auch diese Entwicklung ist vor allem auf Technologieänderungen im industriellen Sektor, hauptsächlich auf die Umstellung im Eisen- und Stahlsektor von der bisher etablierten Hochofenroute hin zur Direktreduktion in Kombination mit

Elektrolichtbogenofen, zurückzuführen. Die dadurch veränderten Energiebedarfe sowie dazugehörigen THG-Emissionen innerhalb des Sektors Eisen- und Stahlerzeugung sind im Anhang in Abbildung 7-3 dargestellt. Im Szenario WAM-OÖ ist es wichtig anzumerken, dass die Gaszusammensetzung des Gases im Gasnetz über den aufgespannten Szenarienzeitraum variiert, wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben wurde. Im Basisjahr 2019 besteht das Gas im Netz zu 100% aus fossilem CH₄, im Verlauf der Szenarientwicklung ändert sich die Zusammensetzung. Es erfolgt die Annahme einer Beimischung von synthetischem bzw. biogenem CH₄ sowie H₂ zum fossilen CH₄, wodurch sich auch die spezifischen THG-Emissionen für Gas aus dem Gasnetz anhand von Tabelle 3-6 ändert. Die beiden Energieträger H₂ sowie auch CH₄ werden separat betrachtet, da es prozessbedingt einen dedizierten H₂- bzw. CH₄-Bedarf im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung sowie in der Chemieindustrie gibt. Im Jahr 2050 beträgt der prozessbedingte H₂-Bedarf 11,7TWh, der prozessbedingte CH₄-Bedarf 10,4TWh. Durch die Elektrifizierung in der Industrie und im Verkehr verzeichnet der Strombedarf einen Anstieg um 11TWh, von 14,5TWh im Jahr 2019 auf 25,5TWh im Jahr 2050. Aufgrund der politischen Vorgaben in Bezug auf Dämmung im Gebäudesektor sowie der Elektrifizierung im Verkehr sinkt der Ölbedarf im Szenario WAM-OÖ um 7,3TWh auf 13,7TWh bis 2050. Die Solarthermie steigt um 0,7TWh auf 1,2TWh im Jahr 2050 an, der Bedarf an Umgebungswärme erfährt einen ähnlichen Anstieg um 0,7TWh auf 1,7TWh im Jahr 2050. Die Fernwärmenachfrage steigt um ca. 1TWh auf 4,2TWh.

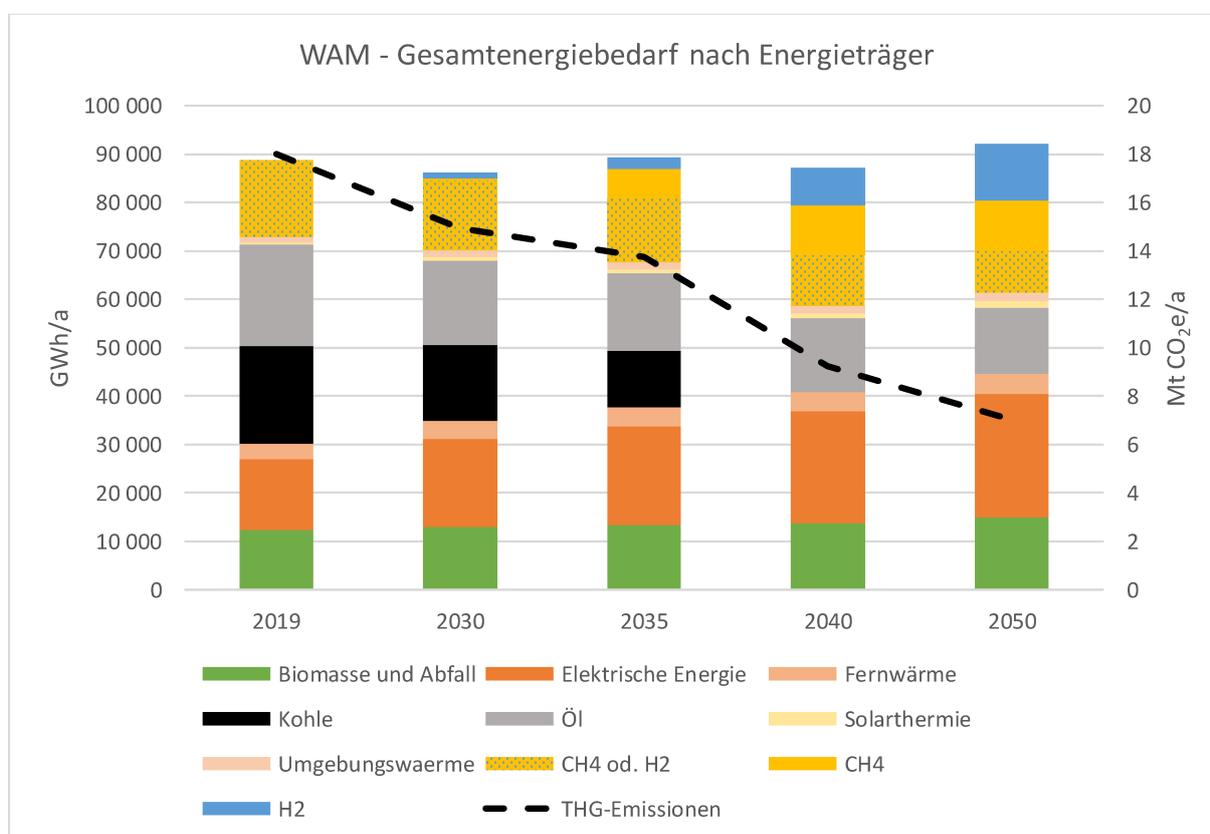


Abbildung 4-3: Gesamtenergiebedarf nach Energieträger – WAM-OÖ

Um den in Abbildung 4-3 dargestellten Verlauf der THG-Emissionen des Szenarios WAM-OÖ besser nachvollziehen zu können, dient Tabelle 4-1. Sie zeigt die Aufteilung der gesamten THG-Emissionen in energiebedingte und prozessbedingte Emissionen. Die THG-Emissionen sinken von 18 MtCO₂e im Jahr 2019 um 11 MtCO₂e auf 7 MtCO₂e im Jahr 2050. Dabei nehmen sowohl die energiebedingten THG-Emissionen um 5,65 MtCO₂e, als auch die prozessbedingten Emissionen um 5,35 MtCO₂e ab.

Tabelle 4-1: Energiebedingte und prozessbedingte THG-Emissionen WAM-OÖ

THG-Emissionen in MtCO ₂ e WAM-OÖ					
Jahr	2019	2030	2035	2040	2050
Energiebedingt	9,9	8,4	7,6	6,4	4,3
Prozessbedingt	8,1	6,6	6,2	2,8	2,7
Summe	18	15	13,8	9,2	7

Der Großteil der Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen wird durch die stufenweise Umstellung der traditionellen Hochofenroute hin zur Direktreduktion in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen erreicht (siehe Tabelle 4-2). Die einzelnen Umstellungsschritte sind in Kapitel 3.5.1 anhand des Dekarbonisierungsplans greentec steel bis 2030 und anhand des Szenarios POI bis 2050 beschrieben worden.

Tabelle 4-2: Prozessbedingter THG-Ausstoß der Voestalpine AG in Linz

Jahr	2019	2030	2035	2040	2050
MtCO ₂ e	7,7	6,3	6,0	2,7	2,7

Wie in Tabelle 4-3 dargestellt, kann außerdem durch die Implementierung von Carbon-Capture in der Zementindustrie eine Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen um ca. 0,32 MtCO₂e erreicht werden. Mit den Capture-Raten aus Tabelle 3-9 gelingt es, den prozessbedingten THG-Ausstoß bis 2050 auf ein Zehntel des Niveaus von 2019 auf 0,035 MtCO₂e zu senken.

Tabelle 4-3: Prozessbedingter THG-Ausstoß der Zementindustrie

Jahr	2019	2030	2035	2040	2050
MtCO ₂ e	0,35	0,26	0,19	0,13	0,035

Abbildung 4-4 zeigt den Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren Transport, Gebäude und Industrie des Szenarios WAM-OÖ, wobei die Industrie einen Anstieg des Gesamtenergieverbrauchs um 5,8TWh auf 55,2TWh bis 2050 erfährt, während der Gesamtenergieverbrauch im Gebäudebereich um 0,6TWh auf 19,3TWh im Jahr 2050 leicht sinkt. Der Endenergieverbrauch der Transportsektoren nimmt um 1,9TWh auf 17,6TWh im Jahr 2050 ab. Bei gemeinsamer Betrachtung resultiert dies im um 3,3TWh leicht steigenden Gesamtenergieverbrauch nach Abbildung 4-3. Der Strombedarf steigt in jedem der drei Hauptsektoren an, wobei der Großteil der Zunahme, nämlich 7,5TWh, von 8,7TWh auf 16,2TWh im Jahr 2050 auf die Industrie zurückzuführen ist. Im Gebäudesektor nimmt die Nachfrage nach ölförmigen Energieträgern aufgrund der politischen Vorgaben (siehe Kapitel 3.5.2) zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs um 2TWh auf 0,6TWh bis 2035 ab. Der übrige Bedarf an ölförmigen Energieträgern von 0,6TWh entfällt auf den Sektor Landwirtschaft und bleibt bis 2050 nahezu konstant. Im Szenario WAM-OÖ sinkt der Anteil an ölförmigen Energieträgern im Transportsektor von 90,5% im Jahr 2019 auf 74,2% im Jahr 2050, was hauptsächlich an der fortschreitenden Elektrifizierung des Sektors sonstiger Landverkehr liegt.

Die größte Änderung der THG-Emissionen ist auf den industriellen Bereich mit einer Abnahme um 8,5 MtCO₂e auf 3,3 MtCO₂e im Jahr 2050 zurückzuführen. In den Gebäudesektoren sinkt der energiebedingte THG-Ausstoß um 1,2 MtCO₂e auf 0,2 MtCO₂e ebenso stark ab, was durch die vorhin angesprochenen politischen Vorgaben für Ölkesseln im Gebäudebereich sowie der sich verändernden Gaszusammensetzung begründet werden kann. Die geringste Abnahme der THG-Emissionen erfährt der Transportsektor, da dort der bereits erwähnte Anteil an ölförmigen Energieträgern den Anteil am Gesamtverbrauch auch im Szenario WAM-OÖ dominiert.

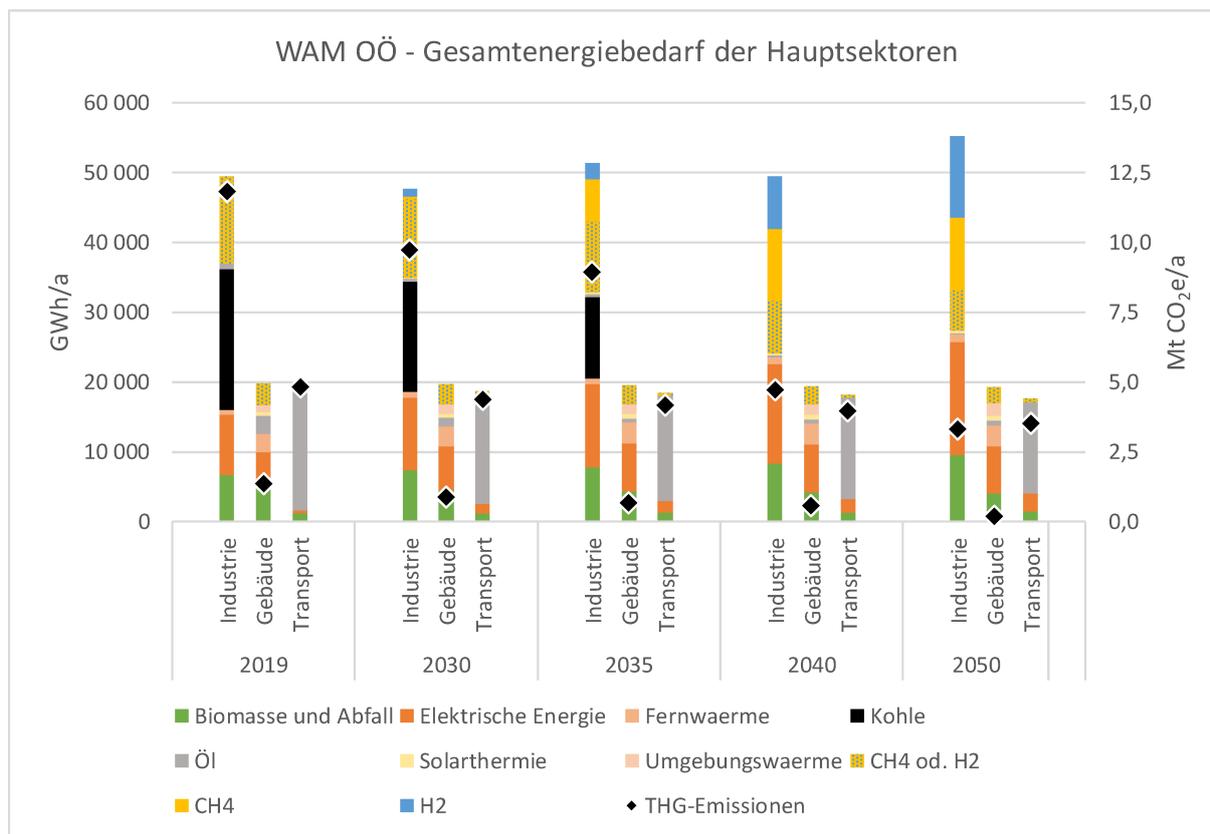


Abbildung 4-4: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – WAM-OÖ

4.3 Ergebnisse Sektorkopplung

Die im Rahmen des Szenarios Sektorkopplung durchgeführte exergiebasierte Betrachtung der in Oberösterreich nachgefragten Nutzenergiemenge aus dem Szenario Trend 2050 ergibt den in Abbildung 4-5 dargestellten Verlauf des Gesamtenergiebedarfs sowie der zugehörigen THG-Emissionen. Der annähernd lineare Verlauf bei der Zu- und Abnahme der Energieträger sowie der THG-Emissionen ist durch die Einschleifung der Energiebedarfe von 2050 aus dem Szenario SK in das Szenario Trend anhand der in Tabelle 3-11 dargestellten Faktoren zu erklären. Der Gesamtenergiebedarf sinkt über die Stützjahre hinweg um 17,3 TWh auf 71,4 TWh im Jahr 2050. Dabei ist besonders der hohe Anteil an H₂ sowie elektrischer Energie im Jahr 2050 deutlich zu erkennen. Der Einsatz von Wasserstoff ist vor allem den industriellen Bereichen, aber auch den Transportsektoren, insbesondere für den LKW-Verkehr, zuzuschreiben. H₂ erfährt einen Anstieg auf 27 TWh bis 2050, Strom verzeichnet eine Zunahme um 10,1 TWh auf 24,6 TWh bis 2050. Im Szenario SK ist Fernwärme, die um 3,1 TWh auf 6,3 TWh bis 2050 zunimmt, der Energieträger mit dem drittgrößten Anteil am Gesamtenergiebedarf. Der Anstieg der Umgebungswärme um 1,8 TWh auf 2,9 TWh bis 2050 kann durch den forcierten Einsatz von Wärmepumpen im Szenario SK erklärt werden.

Im Szenario SK wird durch den Einsatz der systemisch effizientesten Technologien und den Verzicht auf fossile Energieträger das Ziel der Klimaneutralität verfolgt, wodurch eine Abnahme der THG-Emissionen auf unter 0,1 MtCO₂e bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes erzielt wird.

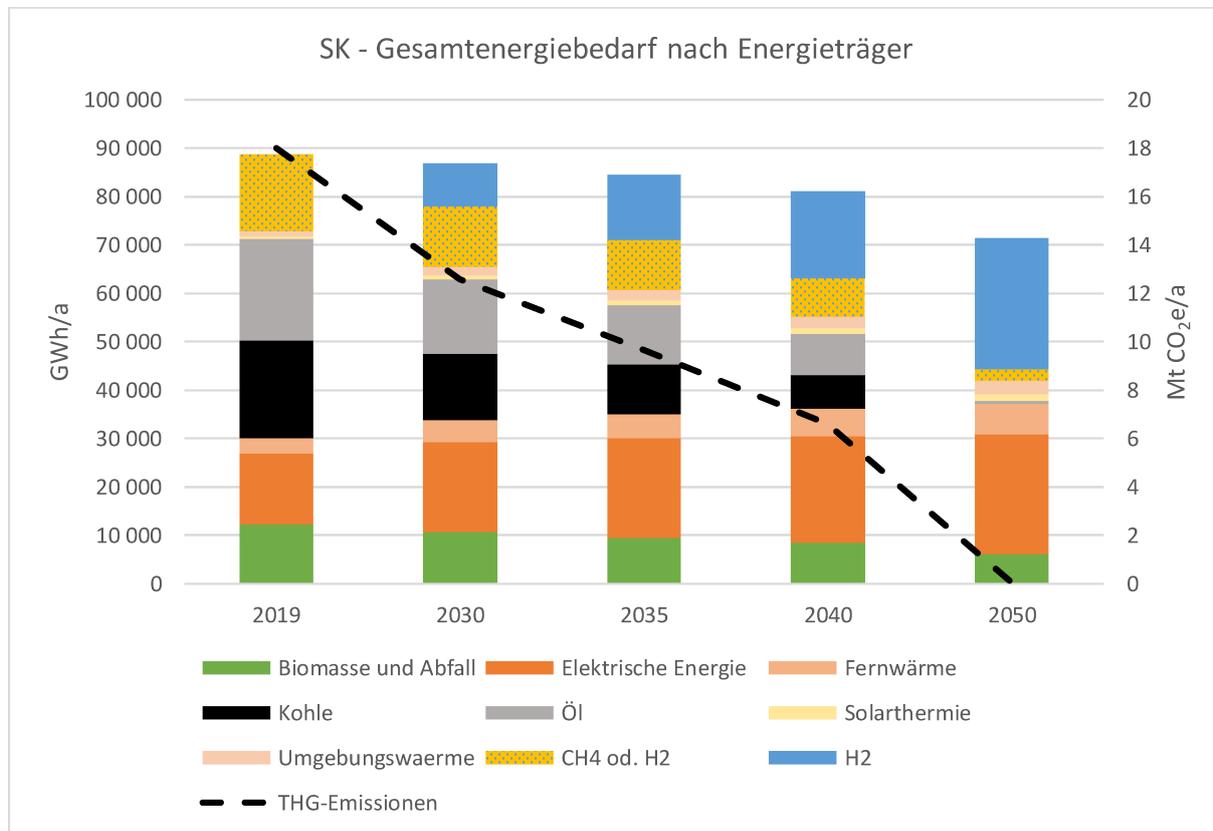


Abbildung 4-5: SK - Gesamtenergiebedarf nach Energieträger

Durch Betrachtung des Szenarios SK auf der Ebene der Hauptsektoren ist eine Abnahme der Energienachfrage als auch der THG-Emissionen im Industrie-, Gebäude- und Transportbereich zu erkennen (siehe Abbildung 4-6). Wie bereits erwähnt, findet besonders im Industrie- und Transportsektor die Substitution fossiler Energieträger durch H₂ und Strom statt. Dadurch steigt der Strombedarf der Industrie um 5,9 TWh auf 14,6 TWh im Jahr 2050, jener der Transportsektoren um fast 5,2 TWh auf 5,6 TWh. Im Gebäudebereich ist der Einsatz von hochexergetischem H₂ im Szenario SK laut der Zielfunktion der Exergieoptimierung nicht vorgesehen, da aus Gründen der exergetischen Effizienz der Einsatz von Wärmepumpen oder industrieller Abwärme sinnvoller ist. Aus diesem Grund werden im Szenario SK bis 2050, neben den hochexergetischen Gasen, auch keine Elektrodirektheizungen im Gebäudesektor Anwendung finden und stattdessen Wärmepumpen, je nach Temperaturniveau, und Fernwärme verstärkt eingesetzt. Durch die Substitution der Elektrodirektheizungen in der Raum- und Warmwasserversorgung durch effizientere Wärmepumpen verringert sich der Strombedarf im Gebäudesektor, allerdings nur um 0,9 TWh auf 4,4 TWh im Jahr 2050, da Gas- und Ölkesseln unter anderem durch stromverbrauchende Wärmepumpen ersetzt werden.

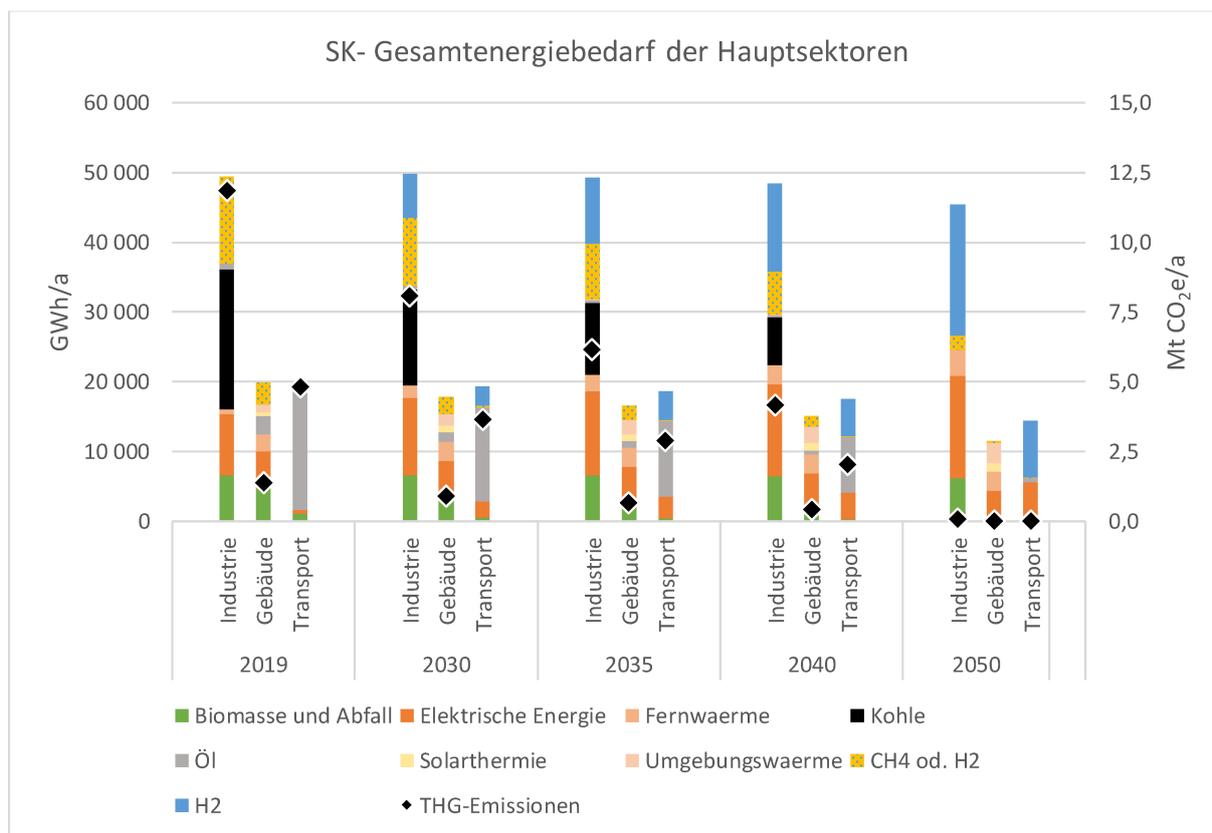


Abbildung 4-6: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – SK

4.4 Ergebnisdiskussion

In diesem Kapitel erfolgt der Vergleich der drei Szenarien untereinander, um die wesentlichen Unterschiede der einzelnen Energienachfrageszenarien zu identifizieren und zu beschreiben. Weiters werden in Kapitel 4.4.2 die wichtigsten Handlungsfelder zum Erreichen der Klimaneutralitätsziele identifiziert und aufgezeigt. Außerdem erfolgt der Vergleich mit Strategien internationaler Staaten zum Erreichen der jeweiligen Dekarbonisierungsziele. Im letzten Abschnitt der Ergebnisdiskussion, der Infrastrukturbetrachtung, wird die sich aus den erarbeiteten Szenarien ergebende Herausforderung für Energienetze im Zuge der Transformation des Energiesystems thematisiert.

4.4.1 Vergleich und Analyse der Energienachfrageszenarien

Um ein besseres Verständnis für die Auswirkungen der angewandten Methodik zur Szenarienmodellierung gemäß Abbildung 3-1 zu erlangen, werden die Gesamtenergiebedarfe sowie THG-Emissionen je Szenario in Abbildung 4-7 visualisiert und miteinander verglichen. Während der Gesamtenergiebedarf im Szenario Trend steigt und im Szenario WAM-OÖ annähernd konstant bleibt, sinkt dieser im Szenario SK auf 71,4 TWh und liegt damit bis 2050 um 35,6 TWh unter jenem des Szenarios Trend. Im Szenario SK ist eine deutliche Minderung des Endenergiebedarfs erkennbar, die aus der in Kapitel 3.6 beschriebenen Anwendung einer exergieoptimierten Zielfunktion für das Szenario SK resultiert. Der steigende Energiebedarf im Szenario Trend lässt darauf schließen, dass die angenommenen Effizienzsteigerungen in den einzelnen Nutzenergiekategorien sowie das Energieeinsparungspotential durch die angenommene Sanierungsrate nach Tabelle 3-7 den Energiehunger, angetrieben durch Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum, nicht zur Gänze kompensieren können. Im Gegensatz dazu wirken die getroffenen Maßnahmen im Szenario WAM-OÖ wie z.B. die höhere Sanierungsrate -1,5%/a statt -0,5%/a in Verbindung mit dem vermehrten Einsatz von Wärmepumpen anstatt Elektrodirektheizungen und fossil befeuerten Kesseln dem Energiehunger entgegen. Die durch die höhere Sanierungsrate erzielte Differenz des Energiebedarfs im Jahr 2050 zwischen Szenario WAM-OÖ und Szenario Trend beträgt ca. 4,4 TWh. Außerdem sinkt der Endenergiebedarf des Kraftverkehrs jährlich um -0,33% bei gleichzeitig steigender Anzahl an gefahrenen Kilometern um 0,30%/a, was durch die fortschreitende Elektrifizierung erklärbar ist. Insgesamt resultieren diese Maßnahmen innerhalb des Szenarios WAM-OÖ in einem um 3,3 TWh leicht steigenden Gesamtendenergiebedarf bis 2050, wobei der Endenergiebedarf um 17,7 TWh geringer ist als im Szenario Trend.

Die THG-Emissionen steigen im Szenario Trend an, während sie im Szenario WAM und SK sinken. Dies ist zum Teil auf die fuel-switches zurückzuführen - die Substitution fossiler Energieträger durch Erneuerbare - die durch die bereits angesprochenen Technologieänderungen in Gebäude-, Transport- und vor allem Industriesektoren resultieren. Gleichzeitig basiert das Szenario Trend auf der Annahme eines konstanten spezifischen Emissionsfaktors für Gas aus dem Gasnetz über den gesamten Betrachtungszeitraum, während in den Szenarien WAM-OÖ und SK die spezifischen Emissionsfaktoren nach Tabelle 3-6 sinken, da die Annahme einer Veränderung im Gesamtenergiesystem erfolgt (vgl. Kapitel 3.2). Der Unterschied in den THG-Emissionen zwischen WAM-OÖ und SK im Jahr 2050 von 6,9 MtCO₂e resultiert einerseits aus den prozessbedingten 2,7 MtCO₂e der Industrie und andererseits aus den energiebedingten Emissionen, die 4,3 MtCO₂e betragen. Ein Großteil des energiebedingten Ausstoßes (3,5 MtCO₂e) stammt aus dem Verkehrssektor.

Während die Emissionsreduktion im Szenario WAM-OÖ bereits bedeutende Fortschritte gegenüber den steigenden Emissionen im Szenario Trend erzielt, zeigt sich deutlich, dass die modellierten Anstrengungen nicht ausreichen, um die zum Ziel gesetzte Klimaneutralität zu erreichen und weitere Anstrengungen notwendig sind. Das Szenario Sektorkopplung zeigt mit einer zunehmenden Elektrifizierung in jedem der Hauptsektoren und dem Setzen auf erneuerbare Gase für industrielle Prozesse wichtige Hebel auf, mit denen die vollständige Dekarbonisierung erreicht werden kann.

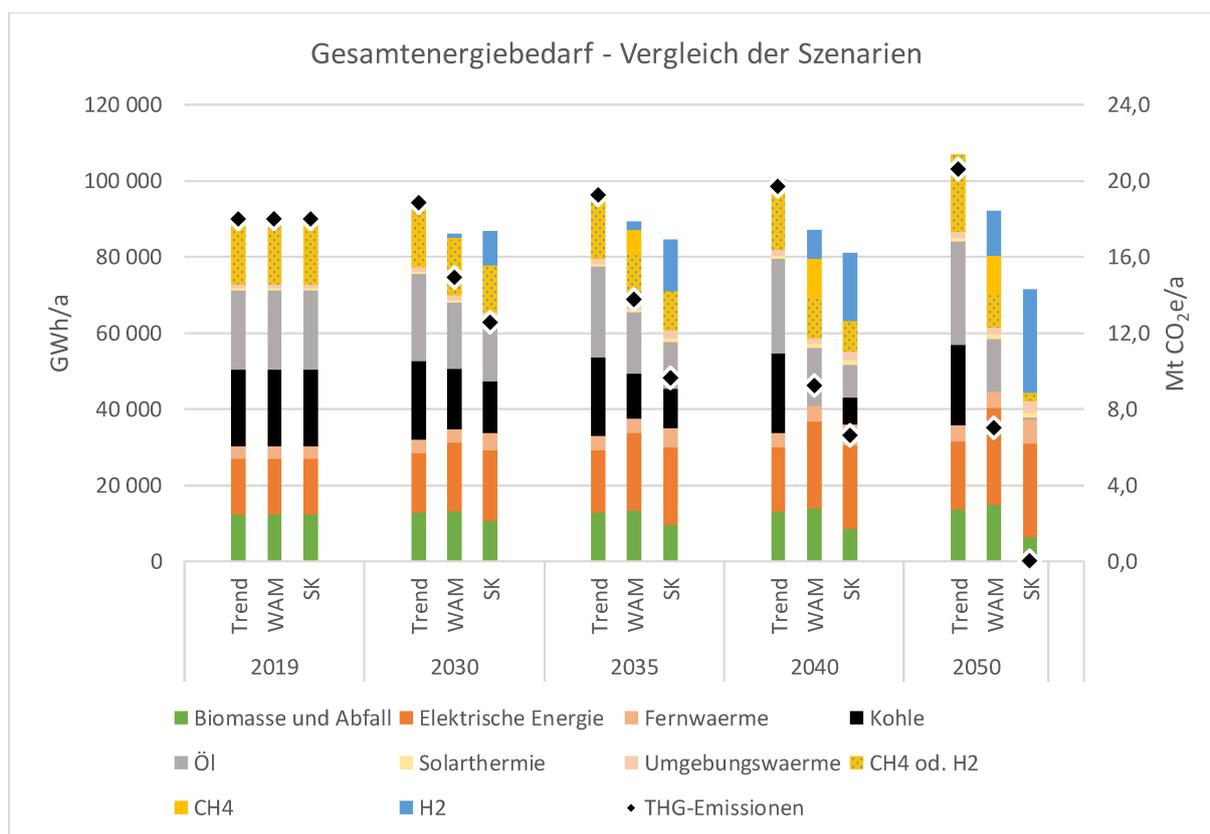


Abbildung 4-7: Gesamtenergiebedarf – Vergleich der Szenarien

Besonders interessant ist eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Energieträger im Vergleich mit dem Referenzszenario Trend. Dazu dient das Delta-Diagramm in Abbildung 4-8, in dem die Differenz des Energiebedarfs jedes einzelnen Energieträgers zwischen WAM-OÖ bzw. SK mit dem Szenario Trend dargestellt ist. Auf der negativen Seite des Energiebedarfs befinden sich in Abbildung 4-8 hauptsächlich fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Erdgas, welche durch mehr Strom, Umgebungs- sowie Fernwärme und Wasserstoff auf der positiven Seite des Energiebedarfs substituiert werden. Im Szenario WAM-OÖ könnte die stufenweise Umstellung der bisher etablierten Hochofenroute hin zur Direktreduktion in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen in der Eisen- und Stahlindustrie eine Adaption der Infrastruktur der leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und H₂ erfordern. Durch die Umstellung laut

Kapitel 3.5.1 erfolgt die Reduktion des Eisenerzes mittels CH_4 anstatt Kohle - was durch Abbildung 4-8 deutlich zum Ausdruck gebracht wird, - während ab dem Jahr 2040 für den Reduktionsprozess eine Substitution von bis zu 30 % des CH_4 durch H_2 laut POI erwartet wird [16]. Im Szenario SK ist vor allem auf den hohen Wasserstoffbedarf von 27 TWh, hinsichtlich infrastruktureller Kapazitäten, hinzuweisen. Um den eingesetzten Wasserstoff auch grün produzieren und somit klimawirksame THG-Emissionen vermeiden zu können, ist davon auszugehen, dass die Kapazität an erneuerbaren Energieträgern stark ausgebaut werden muss. Im Jahr 2020 wurden in Oberösterreich ca. 11,6 TWh elektrische Energie mithilfe von erneuerbaren Energiequellen erzeugt [31]. Für den im Szenario SK gegebenen Wasserstoffbedarf von 27 TWh im Jahr 2050 benötigt es insgesamt ca. 38,6 TWh erneuerbare elektrische Energiequellen, wenn der angenommene Elektrolysewirkungsgrad von 70 % aus NEFI verwendet wird [16]. Sollte der gesamte Wasserstoff im Inland produziert werden, hätte dies neben der dringenden Notwendigkeit des forcierten Ausbaus an erneuerbaren Energiequellen eine hohe Belastung für die elektrischen Übertragungs- und Verteilernetze in Oberösterreich zur Folge. Aktuell sieht die Energiestrategie Oberösterreichs: „Energie Leitregion OÖ 2050“ vor, bis 2030 circa 15,3 TWh elektrische Energie aus erneuerbaren Energiequellen in Oberösterreich zu erzeugen [31]. Das technische Potential für elektrische Energie aus Erneuerbaren in Oberösterreich für das Jahr 2050 entspricht den Erhebungen nach Sejkora et al. [32] bzw. Gaugl et al. [33] ca. 38 TWh, was in etwa der gesamten Strommenge für die Erzeugung des H_2 -Bedarfs im Szenario SK entspricht. An diesem Vergleich ist gut zu erkennen, dass das Szenario SK einen Optimalfall darstellt, der die Kosten der Transformation der Infrastruktur nicht berücksichtigt.

Kaum Änderung im Vergleich zum Szenario Trend ist in Abbildung 4-8 beim Energieträger Biomasse und Abfall (Scheitholz, biogene Treibstoffe sowie Abfälle nach Tabelle 3-2) erkennbar. Beim Szenario WAM-OÖ gleicht sich ein steigender Bedarf an Biomasse und Abfall um 2,2 TWh in der Industrie, hauptsächlich aufgrund der Chemie- und Zementindustrie, mit einem um 2,1 TWh niedrigerem Bedarf im Gebäudesektor – im Vergleich zum Szenario Trend – annähernd aus. Der sinkende Bedarf im Gebäudesektor kann hauptsächlich durch den geringeren Gesamtenergiebedarf aufgrund der höheren Sanierungsraten im Szenario WAM-OÖ begründet werden. Zu einem kleineren Anteil ist der Rückgang am Energieträger Biomasse und Abfall durch die Substitution eines Teils der älteren, holzbefeuerten Öfen zur Warmwasserversorgung durch Fernwärme und einer steigenden Anzahl an Wärmepumpen zurückzuführen. Im Szenario SK nimmt der Energieträger Biomasse und Abfall um 7,3 TWh im Vergleich zum Szenario Trend stark ab, denn er findet nur noch prozessbedingt in der Papier- und Holzverarbeitungs- sowie Chemieindustrie Verwendung. Ein großer Teil der Biomasse wird im Sinne der Exergieoptimierung zu Biomethan umgewandelt, um der Zielfunktion des möglichst geringen Energieimports gerecht zu werden. Die Umwandlung von Biomasse zu

Biomethan geht mit Umwandlungsverlusten im Sektor Energie einher, wodurch der endenergetische Biomethanverbrauch im Szenario Sektorkopplung mit 2,5 TWh gering ist (siehe Abbildung 4-7).

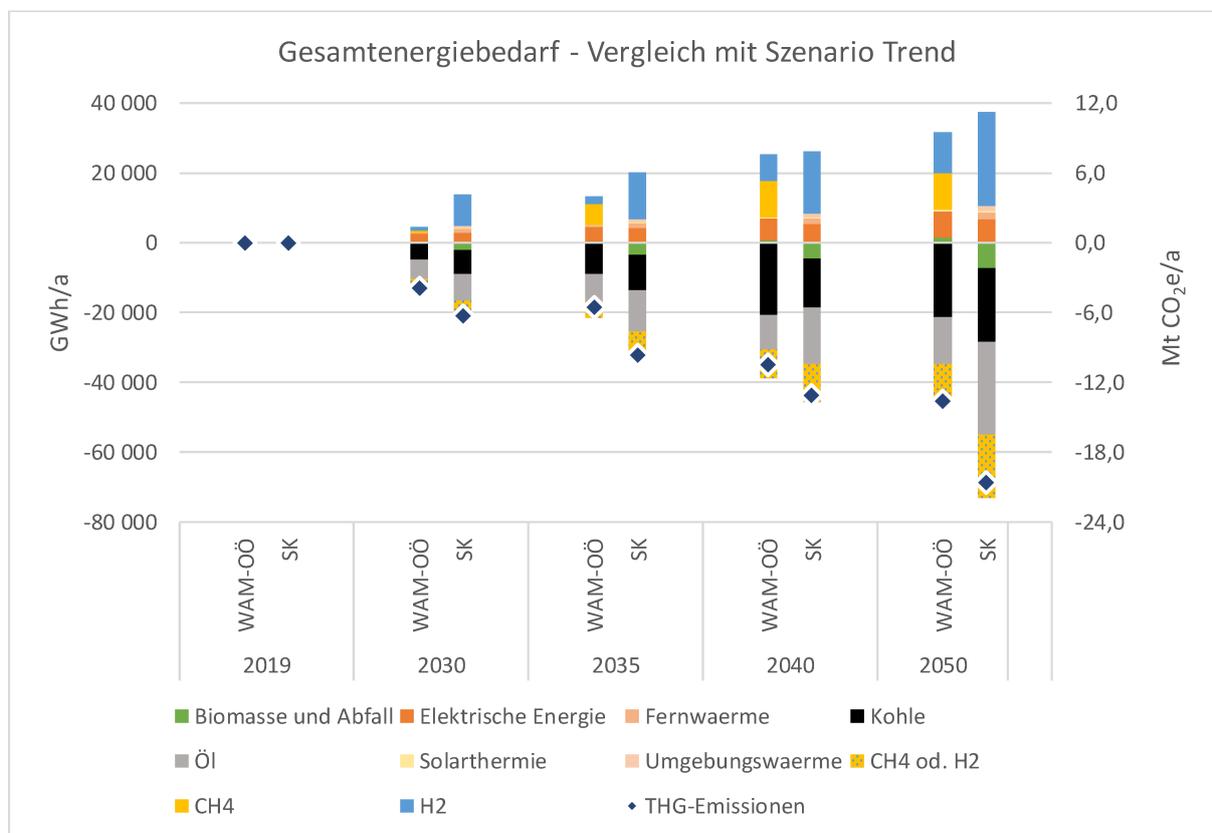


Abbildung 4-8: Delta-Diagramm: Vergleich WAM-OÖ bzw. SK mit dem Szenario Trend

4.4.2 Handlungsfelder zur Dekarbonisierung

Die zuvor diskutierten Änderungen im Gesamtenergiebedarf sowie im Einsatz der einzelnen Energieträger und den damit zusammenhängenden THG-Emissionen können anhand der fünf Säulen der Dekarbonisierung nach Rahnama Mobarakeh und Kienberger [34] zusammengefasst und diskutiert werden:

- Verbesserungen der Energieeffizienz
- Elektrifizierung
- Fuel-switching
- Carbon Capture
- Kreislaufwirtschaft

Zusätzlich sollen Vergleiche mit weiteren Studien sowie politischen Vorgaben anderer Bundesländer oder Staaten am Weg zur Dekarbonisierung herangezogen werden, um auf verschiedene Energiestrategien zur Einhaltung der Klimaneutralitätsziele aufmerksam zu

machen. Ziel dabei ist es, Parallelen mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu ziehen sowie die Wirksamkeit diverser Handlungsfelder aufzuzeigen.

4.4.2.1 *Verbesserungen der Energieeffizienz*

Im Rahmen der Szenarienmodellierung wird die erste Säule der Dekarbonisierung „Verbesserungen der Energieeffizienz“ durch Entwicklungsfaktoren wie Sanierungsraten oder Effizienzsteigerungen der Nutzenergiekategorien Standmotoren, Beleuchtung und EDV sowie Prozesswärme realisiert. Ambitionen hinsichtlich Verbesserungen der Energieeffizienz werden aufgrund von gegenwirkenden Entwicklungsfaktoren wie Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum oder steigender spezifischer Flächennachfrage sowie einer höheren Anzahl an energieverbrauchenden Geräten gedämpft. Dieses Phänomen, bei dem die erzielten Einsparungen durch gesteigerte Energieeffizienz teilweise durch erhöhten Energieverbrauch aufgrund gesteigerter Nutzung oder höherer Geräteanzahl kompensiert werden, wird allgemein als Rebound-Effekt bezeichnet [35]. Die Auswirkung dieses Effekts auf den Gesamtenergiebedarf variiert je nach betrachtetem Szenario. Im Szenario Trend steigt der Gesamtenergiebedarf, im Szenario WAM-OÖ ist er annähernd gleichbleibend und im Szenario SK sinkt der Gesamtenergiebedarf. Trotz des Rebound-Effekts stellt die Verbesserung der Energieeffizienz eine wichtige Säule am Weg zur dekarbonisierten Energiezukunft dar. So ist sie in vielen nationalen Programmen, Gesetzen oder Studien die Verbesserung der Energieeffizienz verankert, wie z.B. im langfristigen Plan zur Erreichung der „Net-Zero GHG Emissions“ der USA [36], dem Energieeffizienzgesetz Deutschlands, dass u.a. eine jährliche Endenergieeinsparung von 2 % vorsieht [37], oder dem Energieeffizienzgesetz Österreichs [38] sowie der Studie zur Entwicklung des Raumwärmebedarfs der AEA [20].

4.4.2.2 *Carbon Capture*

Ein weiterer Pfeiler in Richtung dekarbonisierter Energiezukunft stellt die Technologie des Carbon Captures (CC) dar. Damit können nicht vermeidbare, prozessbedingte CO₂-Emissionen eingefangen werden. Die Implementierung des Carbon Captures findet im Rahmen dieser Arbeit im Szenario WAM-OÖ und im Szenario SK in der Zementindustrie Anwendung, wodurch bis 2050 ca. 0,3 MtCO₂e bei gleichbleibender Zementproduktion eingespart werden können. Die meisten prozessbedingten Emissionen in Oberösterreich verursacht die Stahlproduktion. Durch die Technologiemstellung können die prozessbedingten THG-Emissionen laut Szenario WAM-OÖ zwar von 7,7 MtCO₂e auf 2,7 MtCO₂e gesenkt werden. So sieht beispielsweise die britische Regierung innerhalb des „Green Industrial Revolution“ Plans vor, bis 2030 10 MtCO₂e durch CC im industriellen Bereich einzusparen [39, 40]. Auch viele andere Länder setzen neben natürlichen CO₂-Senken wie Wälder und Moore auf Carbon-Capture and Storage / Utilization, wie z.B. die USA innerhalb des langfristigen Plans zur Erreichung der „Net-Zero GHG

Emissions“ [36]. Allgemein ist festzuhalten, dass in Österreich das Gesetz über das Verbot der geologischen Speicherung von CO₂ gilt. Dadurch ist zwar die Sequestrierung erlaubt, aber die geologische Speicherung verboten. Dieses Gesetz soll alle fünf Jahre auf Basis von internationalen Erfahrungen reevaluiert werden [41].

4.4.2.3 *Fuel-switching*

Besonders durch Technologieumstellungen in den einzelnen Sektoren wird ein fuel-switch erreicht, der eine wichtige Rolle am Weg zur Klimaneutralität einnimmt. Im industriellen Bereich führt insbesondere die Umstellung der Hochofenroute hin zur Direktreduktion mittels CH₄ in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen zu einer Änderung des Energiebedarfs sowie der fuel-shares und der THG-Emissionen. Diese Prozessumstellung in der Primärstahlerzeugung (siehe Abbildung 3-4) bewirkt eine Minderung der THG-Emissionen um ca. 7,7 MtCO₂e (siehe Abbildung 7-3 im Anhang), was bereits über einem Drittel der gesamten, aktuell ausgestoßenen Treibhausgase Oberösterreichs entspricht. Die „grüne Stahlerzeugung“ stellt nicht nur für Oberösterreich einen wichtigen Hebel am Weg zur dekarbonisierten Energiezukunft dar, sondern auch in vielen anderen Staaten mit intensiver Stahlproduktion, wie dem United Kingdom (UK). In den UK liegt der Anteil der THG-Emissionen des Stahlsektors bei 25 % der gesamten industriellen THG-Emissionen [40].

Effizientere Technologien wie Wärmepumpen und Fernwärme – im Vergleich zu Elektrodirektheizungen sowie holz-, öl- oder gasbefeuerten Kessel – zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung oder Elektromotoren anstelle von Verbrennungsmotoren im Verkehrssektor sind weitere essentielle Maßnahmen am Weg zur dekarbonisierten Energiezukunft. So sieht beispielsweise auch die Net-Zero Strategie Deutschlands [39] eine Modernisierung des Gebäudebestands, insbesondere von nachhaltigen Heizsystemen mit einem Anteil von mindestens 50 % an Wärmepumpen vor. Außerdem soll die Umstellung auf 100% emissionsfreie Mobilität gelingen.

4.4.2.4 *Elektrifizierung*

In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen des zuvor diskutierten fuel-switches durch Technologieumstellungen auf den Bedarf an elektrischer Energie aufgezeigt werden. Dazu erfolgt die Betrachtung des industriellen Strombedarfs in Tabelle 4-4. Daraus geht hervor, dass die Nachfrage an elektrischer Energie in der Industrie in allen drei Entwicklungsmöglichkeiten steigt. Am stärksten fällt der Anstieg (2,6 TWh zusätzlich, siehe Abbildung 7-3 im Anhang) in der Stahlerzeugung aufgrund der Integration der EAFs in die Prozessroute, innerhalb des Szenarios WAM-OÖ, aus.

Tabelle 4-4: Strombedarf in der Industrie je Szenario und Betrachtungsjahr

Strombedarf in der Industrie in TWh					
	2019	2030	2035	2040	2050
Trend	8,7	9,4	9,7	10,0	10,7
WAM-OÖ	8,7	10,4	11,8	14,2	16,2
SK	8,7	11,1	12,2	13,1	14,6

Zur Evaluierung der Entwicklung des Strombedarfs aufgrund von Technologieumstellungen in den Gebäudesektoren wird insbesondere die Stromnachfrage für Wärmepumpen anhand der Tabelle 4-5 im Detail betrachtet. In Tabelle 4-5 ist ersichtlich, dass der Strombedarf für Wärmepumpen in allen drei Energienachfrageszenarien steigend ist. Am stärksten ist der Anstieg im Szenario SK, gefolgt vom Szenario WAM-OÖ und dem Szenario Trend. Im Szenario SK wird ein Großteil der Nutzenergie für den Raumwärme- und Warmwasserbedarf, die der Nutzenergie aus dem Szenario Trend im Jahr 2050 entspricht, durch Wärmepumpen gedeckt, wodurch der Bedarf von ca. 1,2 TWh im Jahr 2050 resultiert. Im Szenario WAM-OÖ ist der Strombedarf für Wärmepumpen im Jahr 2050 um 116 GWh höher als im Szenario Trend und beträgt 854 GWh.

Tabelle 4-5: Strombedarf für Wärmepumpen in den Gebäudesektoren je Szenario und Betrachtungsjahr

Strombedarf für Wärmepumpen in GWh					
	2019	2030	2035	2040	2050
Trend	509	580	617	654	738
WAM-OÖ	509	638	694	749	854
SK	509	658	773	889	1207

Um dieser elektrischen Energiemenge mehr Aussagekraft zu verleihen, erfolgt die Umlegung des Strombedarfs in die Anzahl an Wärmepumpen. Dazu wird der Strombedarf in GWh durch die durchschnittliche Anzahl an Volllaststunden von 2150 h [42] S. 15 im Jahr dividiert, um die

gesamte installierte Wärmepumpenleistung in kW zu erhalten. Die gesamte installierte Wärmepumpenleistung wird mit einer angenommenen mittleren Leistung von 8 kW pro Wärmepumpe dividiert, um die Anzahl an Wärmepumpen zu erhalten. So ergeben sich für das Szenario Trend ca. 42.900 Wärmepumpen im Jahr 2050, für das Szenario WAM-OÖ 49.600 und für das Szenario SK 70.200 Wärmepumpen für private Haushalte und öffentliche- und private Dienstleistungsgebäude in Oberösterreich. Vergleichsweise waren im Jahr 2021 ca. 385.000 Wärmepumpen in Österreich installiert [43].

Die Elektrifizierung im Kraftverkehr (PKW, LKW) und der dazugehörige Strombedarf je Szenario und Betrachtungsjahr ist in Tabelle 4-6 zusammengefasst dargestellt. Im Szenario Trend, das die Fortschreibung der Jahre 2015 bis 2019 darstellt, ist der Anstieg des Strombedarfs auf ca. 480 GWh bis zum Jahr 2050 gering im Vergleich zu den beiden Entwicklungsmöglichkeiten nach WAM-OÖ (2305 GWh) und SK (5355 GWh). Im Szenario SK wird der gesamte Nutzenergiebedarf des Kraftverkehrs, der wiederum dem Nutzenergiebedarf aus dem Szenario Trend vom Jahr 2050 entspricht, durch die Energieträger Strom und Wasserstoff gedeckt, wobei Wasserstoff hauptsächlich im Schwerverkehr eingesetzt wird. Aufgrund der höheren Wirkungsgrade des Elektromotors und der Brennstoffzelle ergibt sich im Szenario SK ein geringerer Endenergieverbrauch als im Szenario Trend, wobei die Anzahl der gefahrenen Kilometer, was der Nutzenergie entspricht, gleichbleibend ist. Der Endenergieverbrauch des Kraftverkehrs beträgt im Szenario Trend 25,2 TWh und im Szenario SK 13,5 TWh im Jahr 2050. Im Szenario WAM-OÖ ergibt sich für das Jahr 2050 ein Endenergieverbrauch von 16,7 TWh, wobei der Anteil des Stroms (=Elektrifizierungsgrad) an der Endenergie 13,8% und der Elektrifizierungsgrad der Nutzenergie 33% beträgt. Das bedeutet, dass im Szenario WAM-OÖ 33% der gefahrenen Kilometer des Kraftverkehrs mithilfe der E-Mobilität erfolgen.

Tabelle 4-6: Strombedarf für den Verkehr (PKW, LKW) je Szenario und Betrachtungsjahr

Strombedarf für den Verkehr (PKW, LKW) in GWh					
	2019	2030	2035	2040	2050
Trend	295	352	380	411	479
WAM-OÖ	295	1058	1386	1703	2305
SK	295	2020	2868	3707	5355

Die fünfte Säule, „Kreislaufwirtschaft“, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, alle anderen wurden in der Entwicklung der Energienachfrageszenarien implementiert und weisen insbesondere die Gemeinsamkeit auf, dass eine dekarbonisierte Zukunft einen massiv

steigenden Strombedarf bedingt. Außerdem erfordert es einen anderen Zu- und Umgang mit hochexergetischer Energie in Form von Gas, wie es im Szenario SK demonstriert wird.

4.4.3 Infrastrukturbetrachtung

Der Vergleich der Energienachfrageszenarien untereinander in Kapitel 4.4.1 und insbesondere Abbildung 4-8 weisen deutlich darauf hin, dass im Zuge der Dekarbonisierung im Szenario WAM-OÖ und Szenario SK ein fuel-switch erfolgt. Dabei werden vor allem nicht-leitungsgebundene, fossile Energieträger durch erneuerbare, leitungsgebundene Energieträger substituiert. Diese Tatsache legt die Betrachtung der leitungsgebundenen Energienetze, insbesondere des Stromnetzes, nahe, welches aufgrund der im Vergleich zu den Gasleitungen kleinen Leistungsübertragungskapazitäten als kritischstes Element zu betrachten ist. Um nicht alle Energienachfrageszenarien einer Infrastrukturbetrachtung unterziehen zu müssen, kann im Sinne der Ressourceneffizienz und no-regret Strategie die Auswahl eines zu betrachtenden Szenarios erfolgen. Dieses Szenario stellt eine Synthese aus der bisher vorgestellten Bandbreite an Szenarien dar und wird Szenario Infrastrukturbetrachtung (ISB) genannt. Das Szenario ISB ist eine Adaption des Szenarios WAM-OÖ, bei der Modifikationen in den Gebäude- und Transportsektoren, in Zusammenarbeit mit lokalen Stakeholdern aus dem Bereich der oberösterreichischen Energiewirtschaft, vorgenommen werden. Besonderes Augenmerk wird im Szenario ISB auf die Jahresenergiemengen von 2030 und 2040 gelegt. Im Gebäudesektor wird der Nutzenergiebedarf durch die systemisch effizientesten Technologien gemäß der Identifikation im Szenario SK gedeckt. Die Modifikation des Transportsektors erfolgt im Straßen-Kraftverkehr, für den eine progressivere Elektrifizierungsrate für PKWs in Kombination mit vermehrtem Einsatz an H₂ für den Schwerverkehr gemäß Szenario SK angenommen wird. Die Nutzenergiebedarfe bleiben dabei unverändert im Vergleich zum Szenario WAM-OÖ. Der Hauptzweck dieser Modifikationen besteht darin, einen aus heutiger Sicht möglichst wahrscheinlichen Zustand der Energienachfrage abzubilden, um die Infrastrukturergebnisse auf eine möglichst robuste Basis stellen zu können. Die genaue Methodik zur Durchführung der Modifikationen des Szenarios ISB ist im Anhang in Kapitel 7.1 erläutert.

In diesem Kapitel erfolgt der direkte Vergleich des Syntheszenarios ISB mit dem zugrundeliegenden Szenario WAM-OÖ, da die Modifikationen ausschließlich die Transport- und Gebäudesektoren betreffen, werden diese in einem Delta-Diagramm in Abbildung 4-9 dargestellt. Die Energieträger auf der negativen Seite der horizontalen Achse werden im Szenario ISB durch die Energieträger, die sich auf der positiven Seite der horizontalen Achse befinden, substituiert. Im Gebäudesektor wird die flächendeckende Nutzung von Wärmepumpen und Fernwärme als exergetisch günstigste Optionen gemäß Identifizierung im Szenario Sektorkopplung angenommen. Der Ersatz im WAM-OÖ mitmodellierter

Elektrodirektheizungen sowie eines Teils der fossil- und holzbefeuerten Kessel ergibt den in Abbildung 4-9 dargestellten fuel-switch für den Gebäudesektor. Der Strombedarf sinkt bis 2040 um ca. 2,2TWh im Vergleich zum Szenario WAM-OÖ, während vor allem der Fernwärmebedarf massiv um ca. 4TWh höher ist als im WAM-OÖ. Weiters ist ein höherer Umgebungswärmebedarf um ca. 0,6TWh zu erkennen, was bei einem angenommenen COP von drei auf einen steigenden Strombedarf für Wärmepumpen von 0,3 TWh bis 2040 im Szenario ISB, verglichen zum Szenario WAM-OÖ, schließen lässt.

Für den Transportsektor geht die sukzessive Substitution der ölförmigen Energieträger (Diesel, Benzin) durch elektrische Energie für PKWs sowie H₂ für LKWs aus der Abbildung 4-9 hervor. Besonders auffällig im Transportsektor ist die Tatsache, dass im Jahr 2040 ca. 40TWh die Substitution von 10,3TWh Endenergie bewältigen sollen, wobei sich die Anzahl der gefahrenen Kilometer zwischen WAM-OÖ und ISB nicht verändert. Das ist aufgrund der unterschiedlichen Effizienzen der einzelnen Antriebstechnologien möglich, die in Tabelle 7-4 im Anhang angeführt sind. Ein direkter Vergleich der Endenergien für den Kraftverkehr zwischen WAM-OÖ und ISB ist im Anhang in Abbildung 7-4 dargestellt.

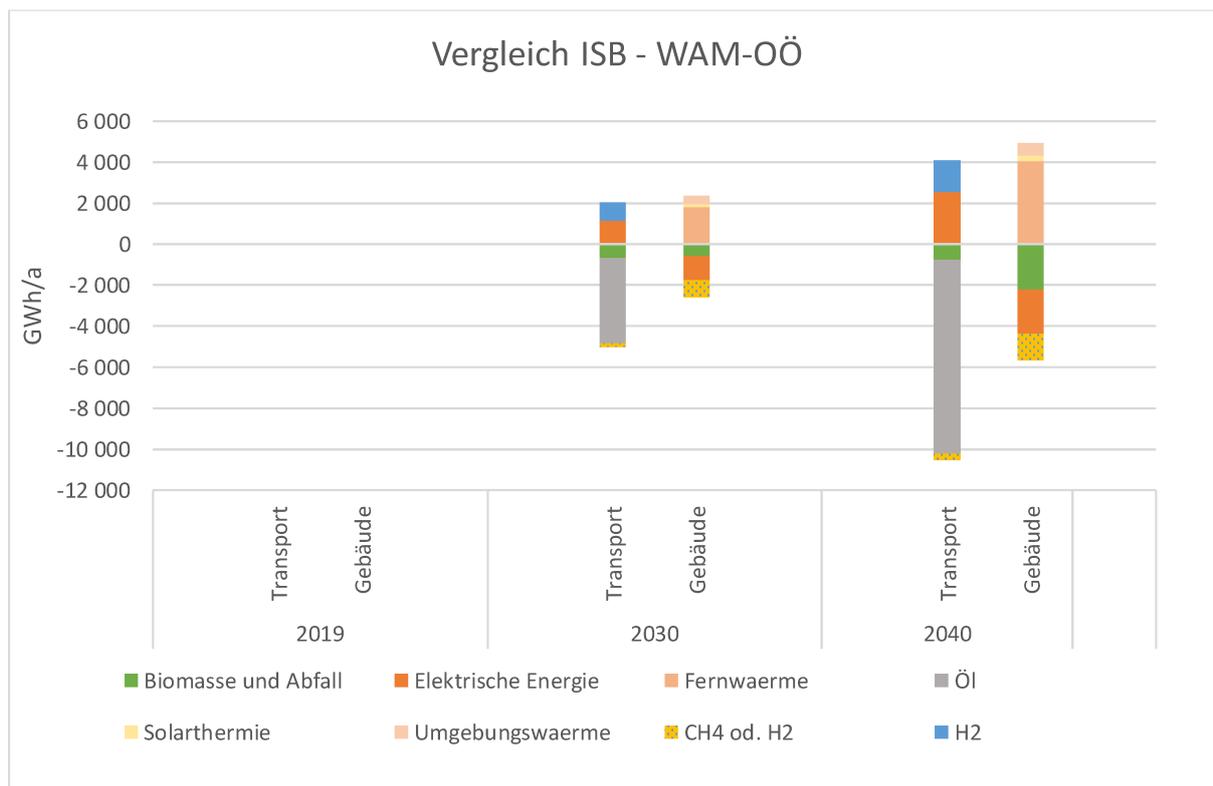


Abbildung 4-9: Delta-Diagramm: Vergleich ISB versus WAM-OÖ für Transport- und Gebäudesektoren

Besonderes Augenmerk gilt im Rahmen des Szenarios ISB den leitungsgebundenen Energieträgern Strom und Gas (CH₄, H₂, CH₄ od. H₂), die gemäß der Identifikation des fuel-switches zur Dekarbonisierung zunehmen. Aus diesem Grund werden in Abbildung 4-10 die oben angeführten leitungsgebundenen Energieträger für die Jahre 2030 und 2040 nach

Hauptsektoren dargestellt. Der größte Anstieg ist im Wasserstoffbedarf zu erkennen, dieser beträgt ca. 9 TWh bis zum Jahr 2040. Wasserstoff wird hauptsächlich in der Chemie- und Stahlindustrie sowie für den Schwerverkehr eingesetzt. Weiters ist der Anstieg des Strombedarfs um ca. 8 TWh, von 15 TWh auf ca. 23 TWh im Jahr 2040 erheblich. Das bedeutet sowohl einen enormen Bedarf an zusätzlichen erneuerbaren Energiequellen als auch die Notwendigkeit der Kapazitätssteigerung an Flexibilitätsoptionen zum Ausgleich der Volatilität erneuerbarer Energiequellen. Insbesondere innerhalb der Industrie und des Kraftverkehrs steigt die Stromnachfrage in Oberösterreich, während im Gebäudesektor laut dem Szenario ISB eine leichte Abnahme des Strombedarfs aufgrund der Substitution der Elektrodirektheizungen durch den vermehrten Einsatz von effizienteren Wärmepumpen zu erkennen ist. Durch die in Kapitel 3.5.1 beschriebene Umstellung der Hochofenroute steigt der Bedarf an prozessbedingtem CH₄ bis zum Jahr 2040 auf über 10 TWh an. Gleichzeitig sinkt die Gasnachfrage aus dem Gasnetz um ca. 7 TWh.

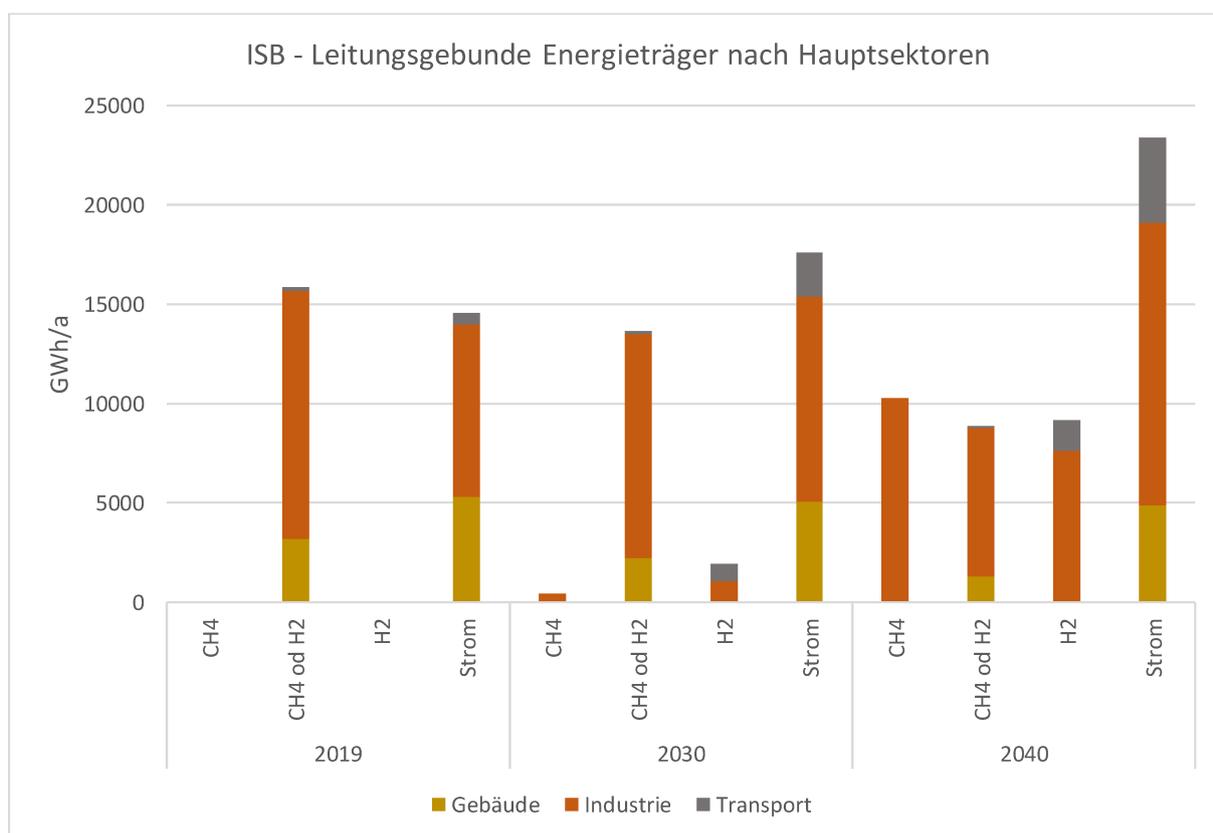


Abbildung 4-10: Entwicklung des Bedarfs an leitungsgebundenen Energieträgern im Szenario ISB

Weitere Ergebnisse zum Szenario ISB, wie der Verlauf des Gesamtenergiebedarfs inklusive zugehöriger THG-Emissionen über die Stützjahre hinweg laut Abbildung 7-1, können aus dem Kapitel 7.2 im Anhang entnommen werden. Der Nutzen des Szenarios ISB für weitere Arbeiten soll im Ausblick näher beschrieben werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die im Rahmen dieser Arbeit modellierten Energienachfrageszenarien für Oberösterreich bieten eine Palette an Entwicklungsmöglichkeiten in Bezug auf Energieverbrauch und THG-Emissionen des stark industrialisierten Bundeslandes. Die große Diversität in der Erstellungsmethodik der Szenarien ermöglicht eine aussagekräftige Analyse der Auswirkungen einzelner Entwicklungsfaktoren und Technologieumstellungen. Dank der sektoralen Betrachtung gelingt die Identifikation der wichtigsten Handlungsfelder und Schwerpunkte je Sektor für das Erreichen der Klimaneutralitätsziele. Eine vollständige Dekarbonisierung ist nur über die gleichzeitige Maßnahmenetzung in der stark vertretenen Industrie Oberösterreichs, sowie in den Gebäude- als auch den Transportsektoren im Zusammenspiel mit politischen Vorgaben und Rahmenbedingungen realisierbar.

In der Industrie, insbesondere der Primärstahlerzeugung, stellt die schrittweise Prozessumstellung - weg von der bisher etablierten Hochofenroute hin zur Direktreduktion in Kombination mit Elektrolichtbogenöfen - einen essentiellen Hebel am Weg zur Dekarbonisierung dar. Allein dadurch wird eine Reduktion der THG-Emissionen in der Höhe von 7 MtCO₂e erzielt (siehe Abbildung 7-3 im Anhang). Weiters kann mit der Implementierung der Carbon-Capture Technologie unvermeidbares, prozessbedingtes CO₂ wieder eingefangen und in einem weiteren Prozessschritt sektorübergreifend, z.B. in der Chemieindustrie [16], genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Ansatz für die Zementindustrie verfolgt, die nach der Primärstahlerzeugung am zweit-meisten prozessbedingte CO₂-Emissionen in Oberösterreich verursacht. Im Gebäudesektor bietet insbesondere die Nutzenergiekategorie Raumklima- und Warmwasserversorgung erhebliches Potential zur Einsparung von THG-Emissionen. Durch effizientere Technologien wie Wärmepumpen und den vermehrten Einsatz von Fernwärme können die exergetisch ungünstigen Elektrodirektheizungen sowie fossil befeuerte Kessel substituiert werden. Damit soll die Deckung des Nutzenergiebedarfs nachhaltiger gestaltet werden. Zusätzlich zur Technologieumstellung im Gebäudebereich stellt eine ambitionierte Sanierungsrate, unterstützt durch politische Substitutionen, einen wichtigen Schritt im Sinne der Energieeffizienz und der Energieeinsparung dar. Der Energieverbrauch des Transportsektors wird vom Kraftverkehr dominiert. Um eine Dekarbonisierung des Kraftverkehrs zu erreichen, erfordert es einen fuel-shift weg von fossil-betriebenen Verbrennungsmotoren. Die Substitution kann insbesondere für PKWs durch Elektromobilität erfolgen, während für den Schwerverkehr der Einsatz von klimaneutral erzeugtem H₂ eine Option bietet.

Die effiziente Wahl des Technologieeinsatzes und der Technologieumstellungen in Kombination mit Effizienzfaktoren eröffnen einen möglichen Pfad für eine klimaneutrale Energiezukunft. Jedes Energienachfrageszenario weist auf eine steigende Elektrifizierung

aufgrund der Substitution fossiler Energieträger wie Kohle und Öl durch Strom hin. Um das Ziel der Klimaneutralität bestmöglich zu erreichen, muss der steigende Strombedarf in allen Hauptsektoren Gebäude, Verkehr und Industrie ausschließlich durch Erneuerbare Energiequellen erzeugt werden. Das technische Potential für elektrische Energie aus Windkraft, PV und Wasserkraft in Oberösterreich für das Jahr 2050 entspricht den Erhebungen nach Sejkora et al. [32] bzw. Gaugl et al. [33] ca. 38TWh. Neben dem wachsendem Strombedarf ist vor allem der Anstieg der gasförmigen Energieträger H₂, CH₄ und Fernwärme in allen Szenarien, außer H₂ im Szenario Trend, zu beobachten. Die in Kapitel 4.4.1 und 4.4.3 angesprochene Substitution nicht-leitungsgebundener Energieträger durch den vermehrten Bedarf an leitungsgebundenen Energieträgern legt eine intensive Beanspruchung der betroffenen Energienetze nahe. Im Rahmen des Szenarios ISB, das als Datenbasis für angehende wissenschaftliche Untersuchungen netzgebundener Energieträger dient, soll die Analyse der in Zukunft deutlich mehr geforderten Energienetze gelingen. Mithilfe der modellierten Jahresenergiemengen des Syntheszenarios sollen Infrastrukturkapazitäten analysiert werden, indem die Jahresenergiemengen räumlich, nach Umspannwerkbezirken, und mittels Zeitreihen im 15-Minuten Intervall zeitlich aufgelöst werden. Um anschließend die bereitzustellenden Leistungen je Zeitschritt und Umspannwerkbezirk ermitteln zu können, müsste man den Verbrauchern Lastprofile zuordnen. Mithilfe einer Software, wie zum Beispiel HyFlow, könnte anschließend die Identifikation von Engpässen in den jeweiligen Energienetzen sowie der Notwendigkeit an Flexibilitätsoptionen, insbesondere im elektrischen Energiesystem, erfolgen.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BMK BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *2015 UN-Klimakonferenz in Paris (COP 21)*. URL https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/int_klimapolitik/klimaverhandlungen/2015_cop21_paris.html. – Aktualisierungsdatum: 2023-08-24 – Überprüfungsdatum 2023-08-24
- [2] OESTERREICH.GV.AT - ÖSTERREICHS DIGITALES AMT: *Das Übereinkommen von Paris*. URL https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000325.html. – Aktualisierungsdatum: 2023-08-24 – Überprüfungsdatum 2023-08-24
- [3] EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE GENERAL FOR ENERGY. ; EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE GENERAL FOR CLIMATE ACTION. ; EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE GENERAL FOR MOBILITY AND TRANSPORT.: *EU reference scenario 2020: energy, transport and GHG emissions : trends to 2050* : Publications Office, 2021
- [4] MARTIN, Baumann: *szenarien_fuer_strom-_und_fernwaermeaufbringung_und_stromnachfrage_im_hinblick_auf_klimaziele_2030_und_2050*. URL https://www.energyagency.at/fileadmin/1_energyagency/projekte/100_prozent_gruener_strom/szenarien_fuer_strom-_und_fernwaermeaufbringung_und_stromnachfrage_im_hinblick_auf_klimaziele_2030_und_2050.pdf – Überprüfungsdatum 2023-08-24
- [5] UBA: *Klimaschutzbericht 2021*. URL <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0776.pdf> – Überprüfungsdatum 2023-09-07
- [6] SEJKORA, Christoph ; KÜHBERGER, Lisa ; RADNER, Fabian ; TRATTNER, Alexander ; KIENBERGER, Thomas: *Exergy as criteria for efficient energy systems – Maximising energy efficiency from resource to energy service, an Austrian case study*. In: *Energy* 239 (2022), S. 122173
- [7] OEMOF-DEVELOPER GROUP: *Welcome to Oemof's Documentation*. URL <https://oemof-solph.readthedocs.io/en/latest>
- [8] STATISTIK AUSTRIA: *Nutzenergieanalyse Oberösterreich ab 2005*. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/nutzenergieanalyse>

- [9] STATISTIK AUSTRIA: *Gesamtenergiebilanz Oberösterreich*. 2022
- [10] STATISTIK AUSTRIA: *Metainformationen zur Nutzenergieanalyse*. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/nutzenergieanalyse>. – Aktualisierungsdatum: 2020
- [11] STATISTIK AUSTRIA: *Energieeinsatz der Haushalte*. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energieeinsatz-der-haushalte>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-12 – Überprüfungsdatum 2023-09-12
- [12] STATISTIK AUSTRIA: *Physische Energieflussrechnungen*. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/physische-energieflussrechnungen>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-12 – Überprüfungsdatum 2023-09-12
- [13] ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR AEA: *Erneuerbares Gas in Österreich 2040 : Quantitative Abschätzung von Nachfrage und Angebot*. Wien, 2021
- [14] NAGOVNAK, Peter ; KIENBERGER, Thomas: *Energy Strategy Reviews : Improving the methodology of national energy balances to adapt to the energy transition*
- [15] WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT: *The Greenhouse Gas Protocol*. 2004
- [16] NEFI - NEW ENERGY FOR INDUSTRY: *Pathway to Industrial Decarbonisation*. Wien, 11.2022
- [17] UMWELTBUNDESAMT: *OLI - Österreichische Luftschadstoff-Inventur*
- [18] ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR AEA: *KLIMANEUTRALITÄT ÖSTERREICHS BIS 2040 : BEITRAG DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE*. Wien, 2021
- [19] STATISTIK AUSTRIA IM AUFTRAG DER ÖROK: *Kleinräumige Bevölkerungsprognose für Österreich*. 2019
- [20] ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR AEA: *Entwicklung des Raumwärmebedarfs in Österreich : Szenarien zum künftigen Bedarf an Raumwärme unter der Berücksichtigung der Nutzung von Gas und des Ziels der Klimaneutralität bis 2040*. Wien, 2022
- [21] ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR AEA: *Entwicklung des Raumwärmebedarfs in Österreich : Szenarien zum künftigen Bedarf an Raumwärme unter der Berücksichtigung der Nutzung von Gas und des Ziels der Klimaneutralität bis 2040*. 2022
- [22] UMWELTBUNDESAMT: *Szenario WAM - NEKP Evaluierung*
- [23] BUNDESMINISTERIUM FÜR FINANZEN: *Langfristige Budgetprognose*. Wien, 2019
- [24] VITA, A. de ; CAPROS, P. ; PAROUSSOS, L. ; FRAGKIADAKIS, K. ; KARKATSOULIS, P. ; HÖGLUND-ISAKSSON, Lena ; WINIWARTER, Wilfried ; PUROHIT, Pallav ; GÓMEZ-SANABRIA, Adriana ; RAFAJ,

- Peter ; WARNECKE, Laura ; DEPPERMAN, Andre ; GUSTI, Mykola ; FRANK, Stefan ; LAURI, Pekka ; DI FULVIO, Fulvio ; FLOROU, A. ; KANNAVOU, M. ; FORSELL, Nicklas ; FOTIOU, T. ; SISKOS, P. ; HAVLÍK, Petr ; TSIROPOULOS, I. ; EVANGELOPOULOU, S. ; WITZKE, Peter ; KESTING, Monika ; KATOUFA, N. ; MITSIOS, I. ; ASIMAKOPOULOU, G. ; KALOKYRIS, T.: *ENERGY, transport and GHG emissions : Trends to 2050 : EU Reference Scenario 2020*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2021
- [25] ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK OIB: *OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz, Langfristige Renovierungsstrategie*. 2020
- [26] voestalpine greentec steel - greentec steel. URL https://www.voestalpine.com/greentecsteel/de/?gclid=EAlaIQobChMI6Lf18PzOgAMVg-R3Ch1tOgtYEAAYASAAEgL0NPD_BwE. – Aktualisierungsdatum: 2023-07-03 – Überprüfungsdatum 2023-08-09
- [27] BMK BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWG)*. URL https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/energiewende/waermestrategie/ewg.html. – Aktualisierungsdatum: 2023-08-25 – Überprüfungsdatum 2023-08-25
- [28] *Ölkesselbauverbotsgesetz - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 09.08.2023*. URL <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010894> – Überprüfungsdatum 2023-08-09
- [29] ZECHMEISTER, Andreas ; ANDERL, Michael ; BARTEL, Andreas ; FREI, Elisabeth ; GUGELE, Bernd ; GÖSSL, Michael: *Klimaschutzbericht 2022*. Wien, 2022 (Report / Umweltbundesamt REP-0816)
- [30] ZECHMEISTER, ANDREAS ET AL. 2021: *UBA - Klimaschutzbericht 2021*. URL <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0776.pdf> – Überprüfungsdatum 2023-08-02
- [31] *OÖ PHOTOVOLTAIK Strategie 2030 (Version 2022)*. URL https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/ooe_photovoltaik_strategie_2030.pdf – Überprüfungsdatum 2023-08-10
- [32] SEJKORA, Christoph ; KÜHBERGER, Lisa ; RADNER, Fabian ; TRATTNER, Alexander ; KIENBERGER, Thomas: *Exergy as Criteria for Efficient Energy Systems—A Spatially Resolved Comparison of the Current Exergy Consumption, the Current Useful Exergy Demand and Renewable Exergy Potential*. In: *Energies* 13 (2020), Nr. 4, S. 843

- [33] GAUGL, Robert ; KLATZER, Thomas ; BACHHIESL, Udo ; WOGGRIN, Sonja ; JODL, Stefan: *GIS-based optimization – achieving Austria’s 2030 wind energy target*. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 138 (2021), Nr. 8, S. 590–596
- [34] RAHNAMA MOBARAKEH, Maedeh ; KIENBERGER, Thomas: *Climate neutrality strategies for energy-intensive industries: An Austrian case study*. In: *Cleaner Engineering and Technology* 10 (2022), S. 100545. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001501>
- [35] *Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden?* URL https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte_wie_koennen_sie_effektiv_begrenzt_werden_handbuch.pdf – Überprüfungsdatum 2023-09-05
- [36] JOHN KERRY ; SPECIAL PRESIDENTIAL ENVOY FOR CLIMATE AND GINA MCCARTHY ; NATIONAL CLIMATE ADVISOR: *The Long-Term Strategy of the United States, Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050*. URL <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf> – Überprüfungsdatum 2023-09-06
- [37] WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, BMWK - BUNDESMINISTERIUM FÜR: *Kabinett beschließt Energieeffizienzgesetz*. URL <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/04/20230419-kabinett-beschliesst-energieeffizienzgesetz.html>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-06 – Überprüfungsdatum 2023-09-06
- [38] *RIS-Energieeffizienzgesetz - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 06.09.2023*. URL <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20008914>
- [39] MCKINSEY & COMPANY: *Net-Zero Deutschland*. URL https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/2021-09-10%20net-zero%20deutschland/210910_mckinsey_net-zero%20deutschland.pdf – Überprüfungsdatum 2023-09-06
- [40] GRIFFIN, Paul W. ; HAMMOND, Geoffrey P.: *The prospects for ‘green steel’ making in a net-zero economy: A UK perspective*. In: *Global Transitions* 3 (2021), S. 72–86. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589791821000013>
- [41] *RIS-Bundesgesetz über das Verbot der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid*. URL https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/RegV/REGV_COO_2026_100_2_693626/COO_2

026_100_2_695510.html. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-06 – Überprüfungsdatum 2023-09-06

- [42] HABERMACHER, Fabienne: *FP-2.8.1_EFZ_Layout_Schlussbericht_def*. URL https://energieforschung-zuerich.ch/media/topics/report/FP-2.8.1_EFZ_Layout_Schlussbericht_def.pdf – Überprüfungsdatum 2023-08-23
- [43] BMK BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Energie in Österreich : Zahlen, Daten, Fakten*. URL <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>
- [44] UMWELTBUNDESAMT: *Energie- und Treibhausgas-Szenarien im Hinblick auf 2030 und 2050*. URL <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0628.pdf> – Überprüfungsdatum 2023-09-04
- [45] TU-GRAZ IEE: *InfraTrans2040*. URL https://www.land-oberoesterreich.gv.at/Mediendateien/Formulare/Dokumente%20PraesD%20Abt_Stat/HH_Fam_Kurzbericht_AEST2020.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-04 – Überprüfungsdatum 2023-09-04

7 ANHANG

Tabelle 7-1: Auflistung der Sektoren innerhalb der Nutzenergieanalyse nach [10]

Hauptsektor	Sektor
Industrie	Eisen- und Stahlerzeugung
	Chemie und Petrochemie
	Nicht Eisen Metalle
	Steine und Erden, Glas
	Fahrzeugbau
	Maschinenbau
	Bergbau
	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak
	Papier und Druck
	Holzverarbeitung
	Bau
	Textil und Leder
	Sonstiger produzierender Bereich
Transport	Eisenbahn
	Sonstiger Landverkehr
	Transport in Rohrfernleitungen
	Binnenschifffahrt
	Flugverkehr
Gebäude	Öffentliche und Private Dienstleistungen
	Private Haushalte

Tabelle 7-2: Angenommene Technologieeffizienzen zur Umrechnung von Endenergie auf Nutzenergie

Technologieeffizienzen (Endenergie – Nutzenergie)		
Nutzenergiekategorien	Technologie	Effizienz in %
Raumheizung	Heizkessel für feste Brennstoffe	90
	Ölzentralheizung	90
	Gaszentralheizung	95
	Elektro	99
	Flüssiggasraumheizung	90
	Fernwärme	80
	Solarkollektoren	100
	Umgebungswärme (WP)	300
Prozesswärme	Kohlebeheizte Öfen	90
	Ölbeheizte Öfen	90
	Gasöfen	95
	Elektro	99
	Fernwärme	80
	Holzöfen	90
Standmotoren	Dieselmotoren	40
	Benzinmotoren	30
	Gasmotoren	35
	Elektromotoren	88
Verkehr (Traktion)	Dieselmotoren	35

	Benzinmotoren	25
	Gasmotoren	30
	Elektromotoren	88
<hr/>		
Beleuchtung und EDV	Halogen	14
	Leuchtstofflampe	58
	LED	28

7.1 Modellierung Szenario ISB

Das Szenario ISB stellt eine Adaption des Szenarios WAM-OÖ dar, indem es Modifikationen in den Gebäude- und Transportsektoren vornimmt. Der Hauptzweck dieser Modifikationen besteht darin, eine progressivere Szenarientwicklung in Zusammenarbeit mit lokalen Stakeholdern aus dem Bereich der oberösterreichischen Energiewirtschaft zu ermöglichen. Insbesondere zielt diese Anpassung darauf ab, die Intensivierung der Elektrifizierung im Verkehr sowie den Einsatz effizienterer Technologien in der Raumwärme- und Warmwasserversorgung innerhalb der Gebäudesektoren zu abbilden.

7.1.1 Modifikationen im Verkehr

Im Rahmen des Szenarios ISB wird der Kraftverkehr, der durch den Sektor „sonstiger Landverkehr“ abgebildet wird, in „PKW“ und „LKW“ aufgeteilt. Diese Vorgehensweise erlaubt die Berücksichtigung unterschiedlicher Einsatzmöglichkeiten von Energieträgern je nach Art des Verkehrsmittels. Für PKWs wird beispielsweise ein höherer Elektrifizierungsgrad als für LKWs, orientiert am Szenario Transition 2017 des Umweltbundesamtes [44], angenommen. Allgemein muss, aufgrund der starken Differenz der Wirkungsgrade der verschiedenen Motortechnologien, unterschieden werden, ob der Elektrifizierungsgrad auf den Endenergie- oder den Nutzenergieverbrauch bezogen wird. Die Umrechnung zum Nutzenergieverbrauch erfolgt durch Multiplikation des Wirkungsgrades von Verbrennungs- bzw. Elektromotor mit dem Endenergieverbrauch des jeweils eingesetzten Energieträgers.

Die nachgefragten Nutzenergien (entspricht den gefahrenen Kilometern) auf Seiten der Verbraucher bleiben im Vergleich zum Szenario WAM-OÖ unverändert und sind der Tabelle 7-3 zu entnehmen. Dieser Nutzenergiebedarf wird anschließend auf die Verkehrsmittel PKW und LKW anhand von Daten aus dem Projekt InfraTrans2040 [45] aufgeteilt. Konkret entfallen dabei 39% auf LKWs und 61% auf PKWs. Die Hauptabsicht der Adaption des Szenarios im

Verkehr – eine höhere Elektrifizierungsgrad im Bereich der PKWs – wird durch die Orientierung an den fuel-shares des energetischen Endverbrauchs (EE) aus dem Szenario Transition 2017 des Umweltbundesamtes [44] umgesetzt. Infolgedessen wird der Nutzenergieverbrauch der PKWs (61%) so auf die einzelnen Energieträger aufgeteilt, dass nach der Division mit den jeweiligen Wirkungsgraden (siehe Tabelle 7-4) der entsprechende EE-Elektrifizierungsgrad für PKWs nach Szenario Transition erreicht wird (siehe Tabelle 7-5). Neben dem Stromanteil wird auch der Anteil an Öl (Diesel, Benzin) und Biofuels nach dem Szenario Transition gerichtet. Die Datenbasis für LKWs stellt das Szenario Sektorkopplung dar, wodurch ein vermehrter Einsatz von H₂ im Antrieb der LKWs berücksichtigt werden kann. Dazu wird die Endenergiemenge jedes Energieträgers aus dem Szenario SK mit dem Nutzenergie-Anteil für LKWs (39%) multipliziert. Durch Multiplikation mit dem Wirkungsgrad der jeweiligen Antriebstechnologie wird die Nutzenergiemenge je Energieträger erhalten und anschließend die Summe der Nutzenergiemenge gebildet. Das Verhältnis der Endenergie zur Nutzenergie wird im nächsten Schritt verwendet, um die bereits bekannte Nutzenergie aus dem Szenario WAM-OÖ auf die gesuchte Endenergie des Szenarios ISB umzulegen. Die gesamte Endenergie im Szenario ISB wird schließlich anhand derselben fuel-shares wie im Szenario SK auf die einzelnen Energieträger aufgeteilt.

Tabelle 7-3: Nutzenergiebedarf im Kraftverkehr im Szenario ISB

	2030	2040	2050
Nutzenergiebedarf in GWh	5600	5810	5990
EE-Elektrifizierungsgrad ISB	17,4%	52,8%	88,2%

Tabelle 7-4: Wirkungsgrade der Antriebstechnologien

Antriebstechnologie für PKW und LKW	Wirkungsgrad
Verbrennungsmotor (Diesel, Benzin, Biofuels)	0,28
Elektromotor	0,85
Brennstoffzelle	0,5

Tabelle 7-5: Endenergie-Elektrifizierungsgrad der PKWs im Szenario ISB

	2030	2040	2050
EE-Elektrifizierungsgrad ISB	17,4%	52,8%	88,2%

7.1.2 Modifikationen im Gebäudesektor

Im Rahmen der Anpassungen in den Gebäudesektoren im Szenario ISB werden effizientere Technologien eingeführt, die sich an dem Szenario Sektorkopplung orientieren. Dazu erfolgt die getrennte Betrachtung des Strombedarfs für die Nutzenergiekategorie „Raumklima und Warmwasser“ für das Szenario WAM-OÖ und Szenario SK. Bekannt sind wiederum die Nutzenergien für WAM-OÖ (= Nutzenergie ISB) und SK sowie die Endenergie für SK. Analog zu den LKWs im Verkehr wird das Verhältnis der Endenergie zur Nutzenergie aus dem Szenario SK dazu verwendet, um die bereits bekannte Nutzenergie aus dem Szenario ISB auf die gesuchte Endenergie des Szenarios ISB umzulegen. Die Endenergie im Szenario ISB wird schließlich auf die Endenergien je Energieträger aufgeteilt, indem dieselben Anteile an Energieträgern wie im Szenario SK verwendet werden. Dadurch erfolgt die Berücksichtigung der im Szenario SK verwendeten Technologien zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs. Die Auswirkungen der vorgenommenen Adaptionen werden in der Ergebnisdiskussion in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

7.2 Ergebnisse ISB

In diesem Kapitel sollen der Gesamtenergieverbrauch sowie die zugehörigen THG-Emissionen des Szenarios ISB, das eine Adaption des Szenarios WAM-OÖ abbildet, dargestellt werden. Die in Kapitel 7.1.1 und 7.1.2 angeführten Modifikationen im Verkehr- und Gebäudesektor ergeben die in Abbildung 7-1 gezeigte Entwicklung des Szenarios ISB. Der Gesamtenergiebedarf sinkt um ca. 6,1 TWh auf 82,6 TWh im Jahr 2050. Dabei ist besonders

das gänzliche Phase-out der Kohle und die starke Reduktion der ölförmigen Energieträger um knapp 20TWh auf 1,2TWh im Jahr 2050 zu erkennen. Die stärksten Zunahmen erfahren die Energieträger Wasserstoff um 13,9TWh, Strom um 11,6TWh und Fernwärme um 6,7TWh.

Die THG-Emissionen sinken im Szenario ISB um 14,4 MtCO₂e auf 3,6 MtCO₂e im Jahr 2050. Der Großteil davon (2,7 MtCO₂e) sind prozessbedingte THG-Emissionen der Industrie. Die starke Reduktion zwischen den Jahren 2035 und 2040 ist hauptsächlich auf die bereits angesprochene Umstellung der Produktionsroute innerhalb der Eisen- und Stahlindustrie sowie auf die Annahme des klimaneutralen Gases im Gasnetz ab 2040 (siehe Tabelle 3-6) zurückzuführen.

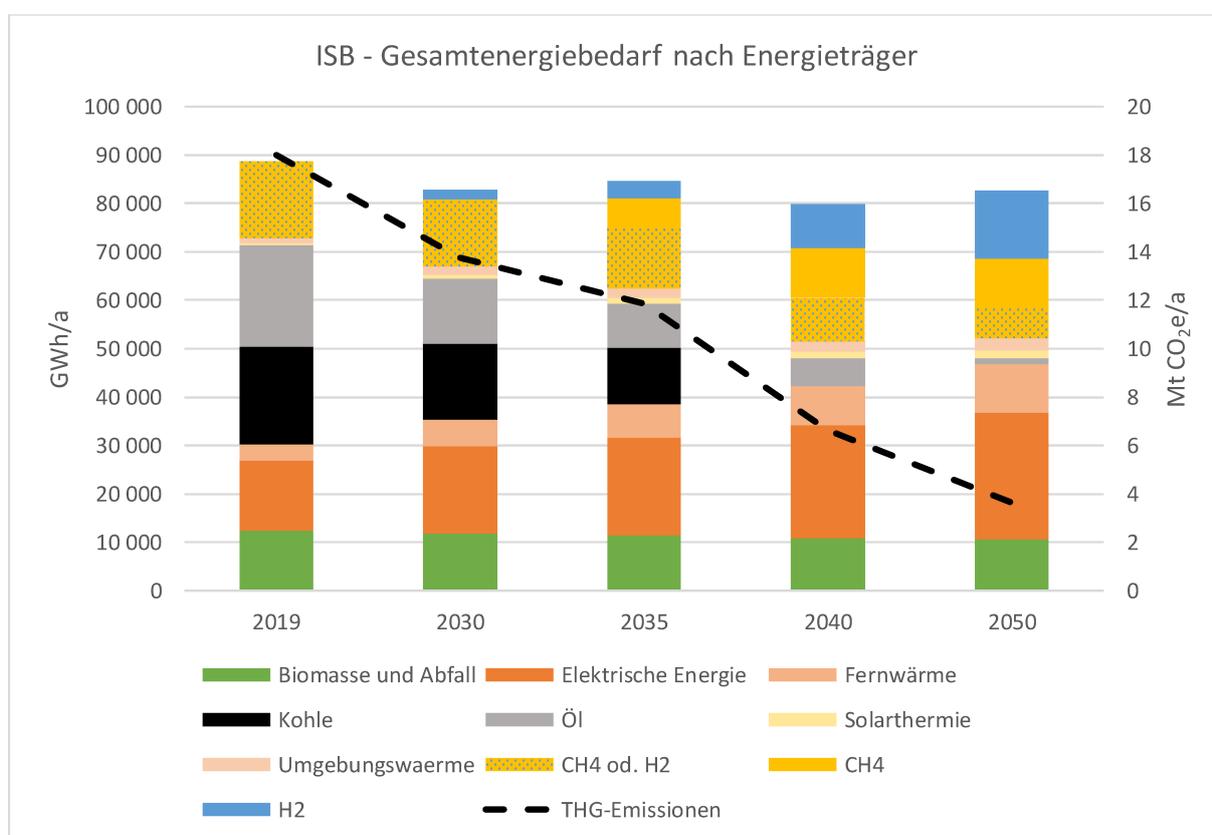


Abbildung 7-1: ISB - Gesamtenergiebedarf nach Energieträger

Zur genaueren Betrachtung und Identifikation der Ursachen für den fuel-shift dient Abbildung 7-2. Der Anstieg des H₂-Bedarfs ist im Szenario ISB einerseits durch die Industrie gegeben, andererseits durch den Verkehrssektor, insbesondere den Schwerverkehr. In der Industrie besteht der größte H₂-Bedarf im Chemiesektor durch die Umstellung des Produktionsverfahrens für die Ammoniakherstellung. Das auf Elektrolyse und H₂-basierte Produktionsverfahren benötigt insgesamt mehr spezifische Energie pro Tonne Ammoniak [16], wodurch der Anstieg des Gesamtenergiebedarfs von 2040 auf 2050 zu erklären ist. Durch die Adaption im Kraftverkehr, den hohen Elektrifizierungsgrad für PKWs sowie den H₂-Einsatz

für den Schwerverkehr, sinkt der Endenergieverbrauch des Transportsektors massiv um ca. 10,3TWh auf 9,2TWh im Jahr 2050. Im Gebäudesektor ist die Minderung des Endenergiebedarfs mit ca. 1,7 TWh geringer als im Transportsektor, da im Gebäudesektor der Effizienzunterschied der Technologien und somit die Differenz zwischen End- und Nutzenergie nicht so groß ist wie im Transportsektor (Verbrennungsmotor – Elektromotor). Außerdem wird der Bedarf an Umgebungswärme durch den Einsatz von Wärmepumpen aufgrund der angewandten Bilanzgrenze und Szenarienmethodik explizit angeführt und beträgt 2,5 TWh im Jahr 2050.

Die bereits angesprochene Abnahme der THG-Emissionen um 14,4 MtCO₂e ist besonders auf den Industrie- und Transportsektor zurückzuführen. Das Szenario ISB stellt einen möglichen Entwicklungspfad dar, indem es durch Anwendung der Modifikationen aus Kapitel 7.1.1 und 7.1.2 gelingt, den Gebäude- und Transportsektor fast vollständig zu dekarbonisieren. Gleichzeitig sinken die THG-Emissionen der Industrie massiv und sind zu einem hohen Anteil prozessbedingte Emissionen der Eisen- und Stahl sowie Zementindustrie.

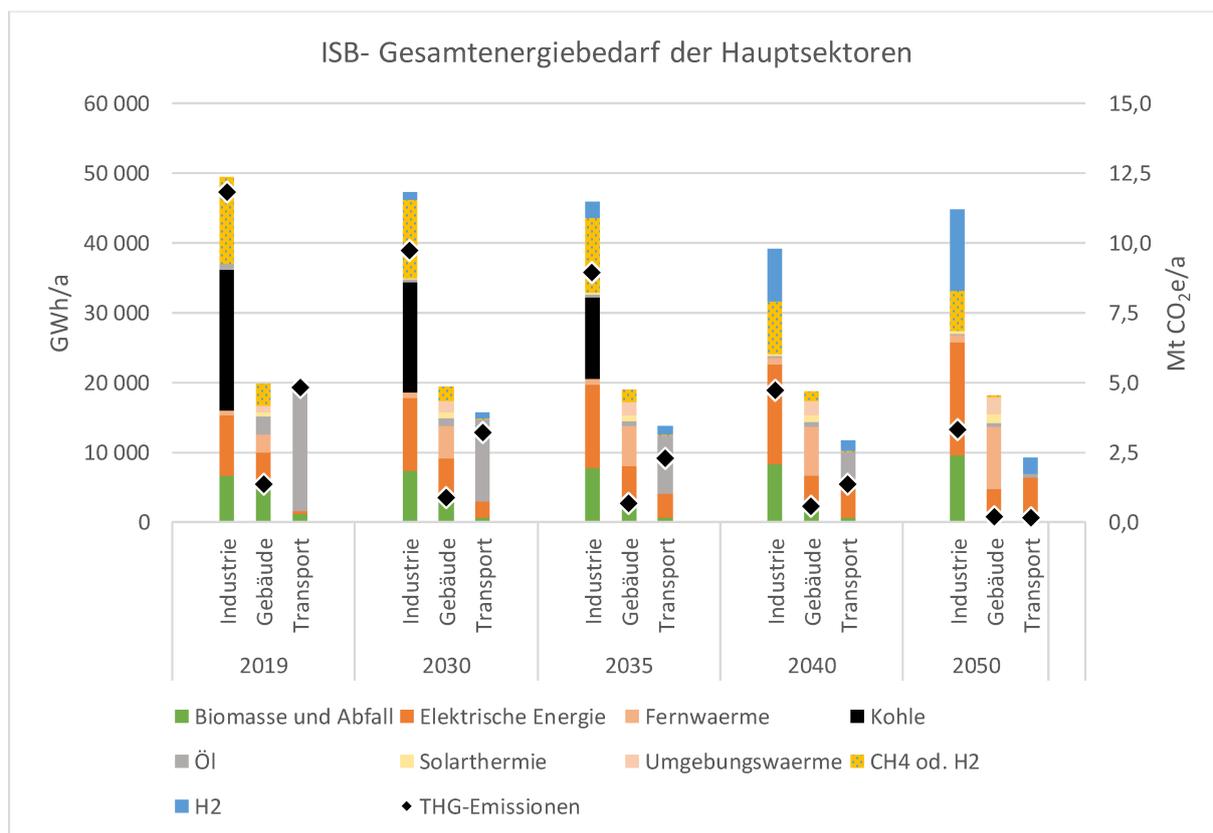


Abbildung 7-2: Gesamtenergiebedarf der Hauptsektoren nach ET – ISB

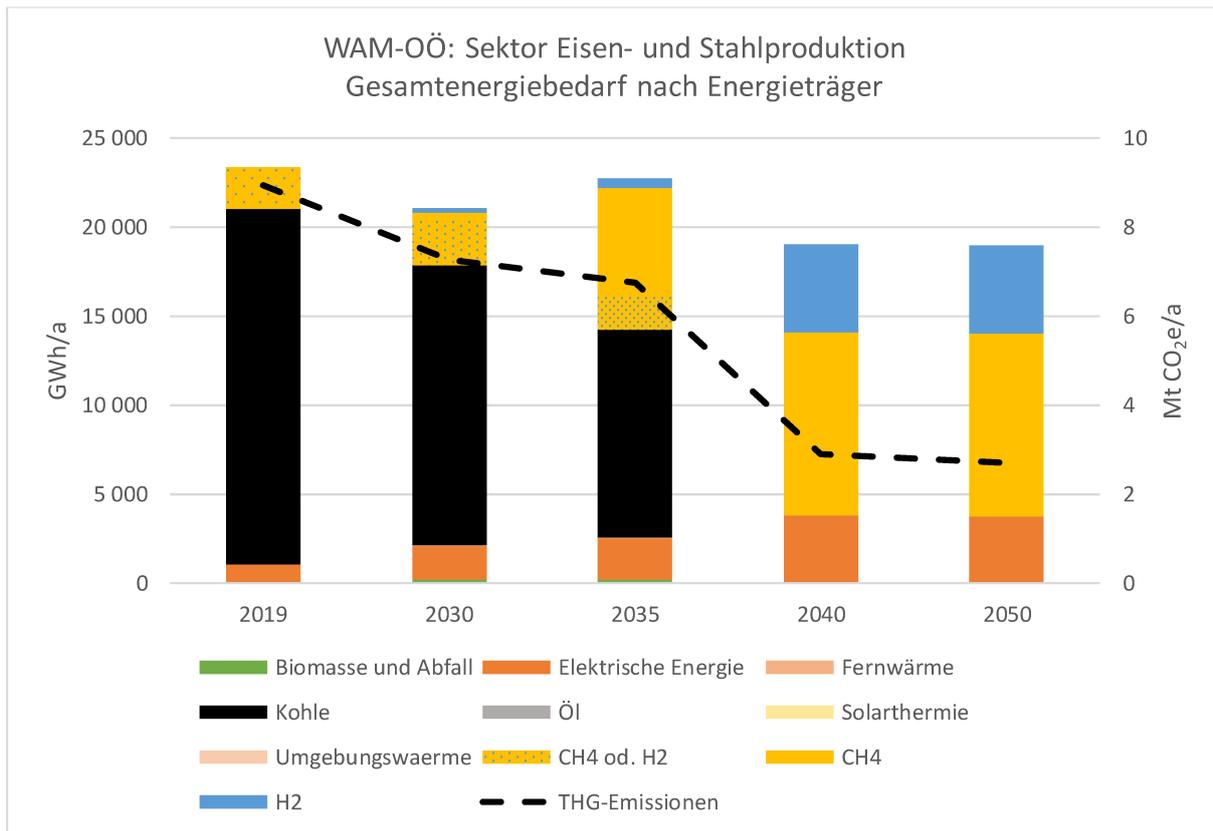


Abbildung 7-3: Gesamtenergiebedarf des Sektors Eisen- und Stahlerzeugung – Szenario WAM-OÖ

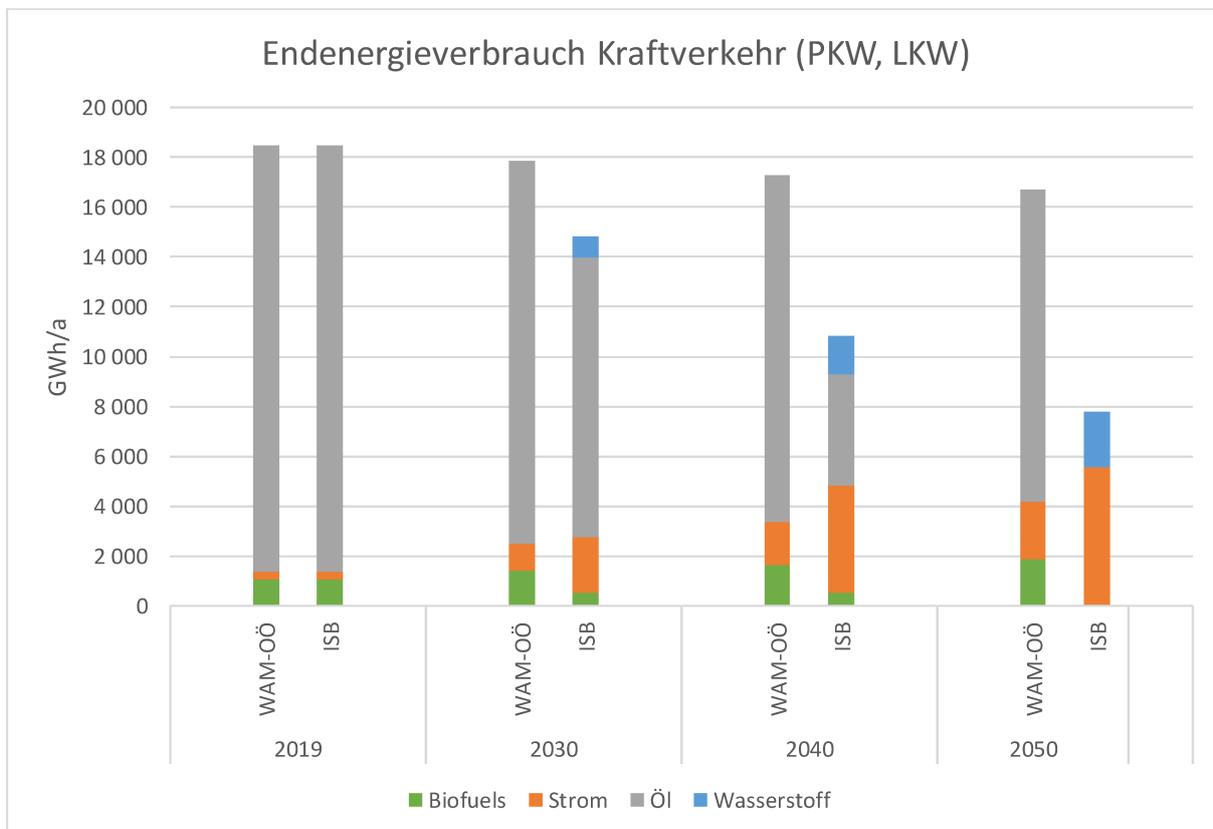


Abbildung 7-4: Endenergieverbrauch von PKW und LKW im Szenarienvergleich ISB vs. WAM-OÖ bei gleichbleibendem Nutzenergiebedarf (d.h. gefahrene Kilometer)