

Teilbericht 4 | November 2022

Beschreibung des Energieversorgungsmodells WISEE-ESM-I



Bericht aus dem
Teilprojekt A.II: SYN-Bedarfe

Mathieu Saurat

Larissa Doré

Tomke Janßen

Sebastian Kiefer

Christine Krüger

Arjuna Nebel

Autorinnen und Autoren:

Mathieu Saurat, Dr. Larissa Doré, Tomke Janßen,
Sebastian Kiefer, Christine Krüger, Dr. Arjuna Nebel

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Unter Mitarbeit von:

Jacqueline Klingen (Wuppertal Institut)

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Saurat, M., Doré, L., Janßen, T., Kiefer, S., Krüger, C., Nebel, A. (2022). Beschreibung des Energieversorgungsmodells WISEE-ESM-I. MENA-Fuels: Teilbericht 4 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Wuppertal, Stuttgart, Köln, Saarbrücken.

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).
Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Danksagung

Dieser Bericht ist innerhalb des Forschungsvorhabens **MENA-Fuels – Roadmaps zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe im MENA-Raum zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland** entstanden. Er wird ergänzt durch weitere publizierte Berichte. Die Herausgeber danken allen beteiligten Forschungsinstituten, dem Fördermittelgeber und seinem Projektträger sowie den projektexternen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie für die konstruktive Zusammenarbeit und die wertvollen Beiträge zur vorliegenden Publikation.

Disclaimer

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 3EIV181A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Das hier verwendete Kartenmaterial dient lediglich der Veranschaulichung. Es beinhaltet keine offizielle Stellungnahme der Bundesrepublik Deutschland zu etwaigen umstrittenen Rechtspositionen von Drittstaaten.

Projektlaufzeit: Dezember 2018 – Juni 2022

Verbundpartner:

Wuppertal Institut (Koordination): PD Dr. Peter Viebahn
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Jürgen Kern
 Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme: Juri Horst

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:

PD Dr. Peter Viebahn (Verbundkoordinator)
Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme
peter.viebahn@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-306

Bildquellen:

Titelseite: GettyImages
Rückseite: eigene Darstellung

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	6
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	6
1 Hintergrund	7
2 Beschreibung des WISEE-ESM-I	9
3 Anpassungen des Open Source Frameworks OSeMOSYS	26
4 Ansätze zur Reduktion der Modellkomplexität	29
5 Literaturverzeichnis	31

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

EE	Erneuerbare Energien
ESM	Energy Supply Model
ESM-D	Energy Supply Model – Dispatch-Modul
ESM-I	Energy Supply Model – Invest Modul
KP-Kategorie	Kostenpotenzialkategorie
KTH	Royal Institute of Technology
MENA	Middle East and Northern Africa (dt.: Nahost und Nordafrika)
OSeMOSYS	The Open Source Energy Modeling System
WI	Wuppertal Institut für Klima Umwelt, Energie gGmbH
WISEE	Wuppertal Institute System Model Architecture for Energy and Emission Scenarios

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Parameter des WISEE-ESM-I-----	12
Tab. 2-2	Variablen des WISEE-ESM-I-----	17

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Struktur des WISEE-ESM-I-----	10
----------	-------------------------------	----

1 Hintergrund

Im Rahmen von Teilprojekt A.II des Vorhabens MENA-Fuels erfolgt die techno-ökonomische Modellierung und Bewertung von Versorgungspfaden Deutschlands und Europas mit Strom und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen aus der MENA-Region¹. Hierfür ist eine umfassende Abbildung des Energiesystems bestehend aus Erzeugungs- und Konversionsanlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen notwendig. Zu dessen Abbildung wird das Invest-Modul des WISEE-ESM herangezogen. WISEE steht für „Wuppertal Institute System Model Architecture for Energy and Emission Scenarios“ und umfasst einen am Wuppertal Institut entwickelten Modellverbund zur modellbasierten Analyse und Bewertung von zukünftigen Energie- und Industriesystemen. Das ESM – kurz für „Energy Supply Model“ – ist Teil dieses Modellverbunds und dient der Analyse zukünftiger Energiesysteme. Das ESM besteht aus zwei Modulen, welche den kostenoptimalen Ausbau (Invest-Modul ESM-I) bzw. den kostenoptimalen Betrieb (Dispatch-Modul ESM-D) von Erzeugungs- und Konversionsanlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen zur Deckung einer exogen vorgegebenen Nachfrage nach Energieträgern abbilden. Im Rahmen des Projektes MENA-Fuels kommt nur das ESM-I zum Einsatz; das ESM-D wird deswegen im Folgenden nicht weiter beschrieben.

Das ESM-I wurde basierend auf dem Open Source Framework zur Energiesystemplanung OSeMOSYS (Howells et al., 2011; Royal Institute of Technology (KTH) et al., 2022) entwickelt, indem folgende Erweiterungen vorgenommen wurden:

- 1 | Objektorientierte Übersetzung des Frameworks in die Programmiersprache Python
- 2 | Einbettung des Frameworks in eine Arbeitsumgebung inklusive einer umfassenden Datenbasis
- 3 | Anpassungen der mathematischen Formulierung des Frameworks

Im Rahmen des MENA-Fuels-Projektes wurde das ESM-I erweitert und auf die hier verfolgten Fragestellungen angewendet. Im vorliegenden Bericht wird zunächst die mathematische Formulierung des ESM-I beschrieben (Kapitel 2). Zur Verdeutlichung der Weiterentwicklungen des ESM-I im Vergleich zum OSeMOSYS-Framework wird in Kapitel 3 eine Übersicht über die wesentlichen Unterschiede in der mathematischen Formulierung gegeben. Zudem werden in Kapitel 4 Ansätze zur Reduktion der Modellkomplexität erläutert, die hier angewendet wurden.

Die Anwendung des ESM-I inklusive der dafür notwendigen umfassenden Datenbasis ist in weiteren Teilberichten des MENA-Fuels-Projektes beschrieben. Im Rahmen der Modellierung wird eine Bandbreite an Szenarien analysiert, um robuste Implikationen ableiten zu können. Dabei werden zunächst drei Szenarien – bezeichnet als Basisszenarien – untersucht, welche das Energiesystem rein techno-ökonomisch ohne Berücksichtigung von Investitionsrisiken in der MENA-Region modellieren. Die drei Szenarien unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der zukünftigen Nachfrageentwicklung. → *Teilbericht 6* stellt die Ergebnisse der Basisszenarien dar und fasst

¹ MENA: Für englisch „Middle East“ (Nahost, ME) und „North Africa“ (Nordafrika, NA)

zudem die zugrunde liegende Datenbasis zusammen. Die Herleitung der Nachfrage wird in → *Teilbericht 5* erläutert.

Basierend auf den Basisszenarien werden weitere Szenariovarianten analysiert, welche Investitionsrisiken in der MENA-Region durch Abbildung länderspezifischer Investitionskosten für Produktionsanlagen und Speicher explizit im Modell abbilden. Zusätzlich werden im Rahmen von Sensitivitäten einzelne Fragestellungen vertieft untersucht. Die Beschreibung der Szenariovarianten und Sensitivitäten ist in → *Teilbericht 7* dargestellt.

2 Beschreibung des WISEE-ESM-I

Das WISEE-ESM-I, kurz als ESM-I bezeichnet, ist ein Modell zur langfristigen Planung und Bewertung von Energiesystemen. Es modelliert und bewertet kostenoptimale Transformationspfade des Energiesystems zur Deckung exogen vorgegebener Bedarfe an Energieträgern und Stoffen. Im Folgenden wird vereinfachend von Energieträgern gesprochen, wobei dieser Begriff auch Stoffe, wie z. B. Ammoniak für die Industrie, umfassen kann. Dabei wird die Produktion der nachgefragten Energieträger aus Inputs (z. B. Solarenergie) in Produktionsanlagen über Zwischenprodukte modellseitig explizit abgebildet. Sowohl das Energieangebot als auch die Energienachfrage werden geografisch und zeitlich aufgelöst betrachtet. Es werden verschiedene geografische Regionen modelliert, so dass ein Austausch von Energieträgern zwischen Regionen möglich ist. Der Austausch erfolgt über Transportinfrastrukturen, welche im Modell explizit berücksichtigt werden. Dabei werden Übertragungskapazitäten als Verbindungen zwischen den Regionen modelliert. Die Übertragungskapazitäten sind als Übertragungsleistung an den Regionengrenzen definiert. Eine Übertragungskapazität steht somit stellvertretend für alle Leitungen, die diese beiden Regionen verbinden. In die Bestimmung der Übertragungsleistung gehen Annahmen zu Rohrdurchmessern, Spannungsebenen usw. ein. Die physischen Leitungen werden im Modell jedoch nicht explizit abgebildet; beispielsweise findet keine Lastflussrechnung statt.

Auf der zeitlichen Ebene wird zwischen Jahren und unterjährigen Zeitperioden, sogenannten *Timeslices*, differenziert. Die Abbildung von Jahren ermöglicht die langfristige Modellierung des Energiesystems über Jahrzehnte. *Timeslices* repräsentieren unterjährige Zeitperioden und ermöglichen die Abbildung kurzfristiger Schwankungen von Energieangebot und -nachfrage. Dabei werden Speicher zum Ausgleich dieser Schwankungen im Modell explizit berücksichtigt. Zusätzlich zu den Speichern werden Ein- und Ausspeichereinheiten als weitere Entitäten im Modell abgebildet. Diese werden modellseitig als Produktionstechnologien dargestellt. Die Speicherung wird auf eine unterjährige Speicherung begrenzt, eine Speicherung zwischen den Jahren ist damit nicht möglich. Diese Modellformulierung reduziert die Komplexität des Planungsproblems wesentlich.

Die Systemgrenze des Modells hinsichtlich modellierter Energieträger und Technologien sowie zeitlicher und geografischer Auflösung kann für jeden Anwendungsfall durch die Verwendung entsprechender Eingangsdaten variiert werden.

Das ESM-I wird als lineares Optimierungsmodell formuliert. Dafür werden Parameter, Variablen, Nebenbedingungen und eine Zielfunktion definiert. Parameter stellen modell-exogene Vorgaben dar und sind damit Eingangsdaten des Modells. Variablen sind das Ergebnis des Modells und repräsentieren damit die kostenoptimalen Entscheidungen des Modells hinsichtlich der Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems. Nebenbedingungen beschränken die Ausprägung der Variablen und damit den Lösungsraum des Modells. Die Zielfunktion stellt das Entscheidungskriterium dar, hinsichtlich dessen die Ausgestaltung des Energiesystems optimiert wird.

Die verschiedenen Bestandteile des Modells werden im Folgenden im Detail beschrieben. Abb. 2-1 fasst die Struktur des ESM-I für die Anwendung im MENA-Fuels-Projekt grafisch zusammen.

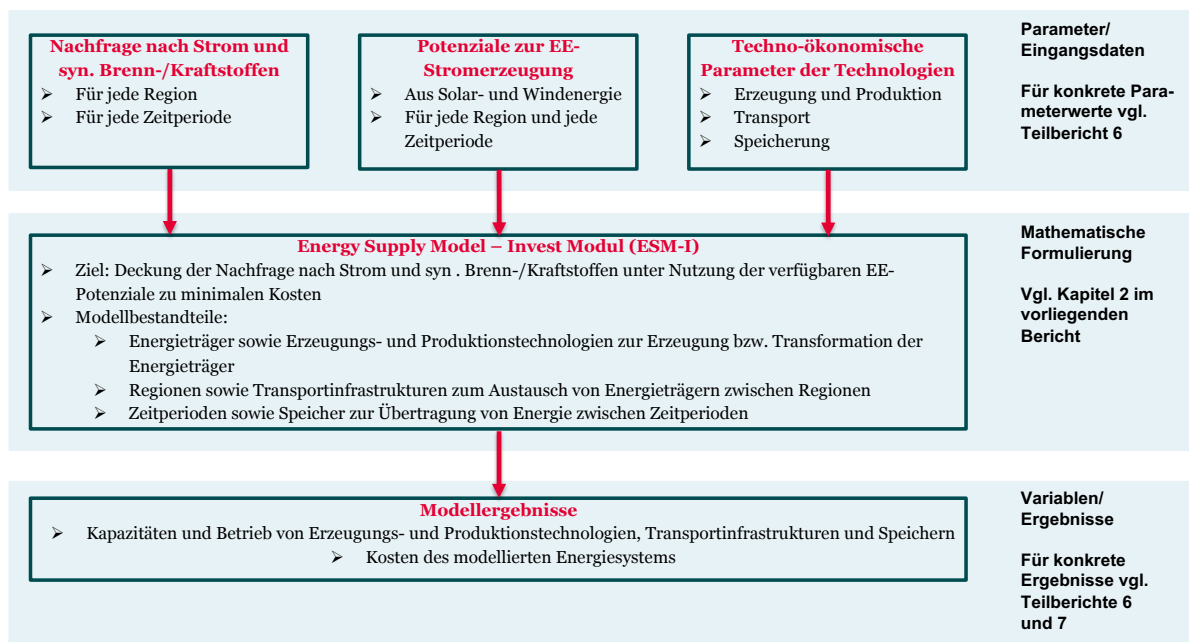


Abb. 2-1 Struktur des WISEE-ESM-I

Parameter

Eine vollständige Übersicht über die im ESM-I abgebildeten Parameter ist in Tab. 2-1 gegeben. Die Parameter betreffen die Nachfrage nach Energieträgern, die Produktionstechnologien, Speicher und Transportinfrastrukturen sowie die Bilanzierung von Emissionen². Darüber hinaus werden globale Parameter sowie Hilfsparameter definiert, wobei letztere nicht in Tab. 2-1 dargestellt sind. Im Folgenden werden die zum Verständnis des Modells wichtigsten Parameter erläutert.

Die Nachfrageparameter umfassen den *SpecifiedAnnualDemand* sowie das *SpecifiedDemandProfile*. Sie stellen die exogen vorgegebene Nachfrage nach Energieträgern dar, welche durch die Produktion der entsprechenden Energieträger modell-seitig erfüllt werden muss. *SpecifiedAnnualDemand* stellt die jährliche Nachfrage eines Energieträgers dar. Da die Nachfrage innerhalb eines Jahres schwanken kann, wird durch das *SpecifiedDemandProfile* die Verteilung der jährlichen Nachfrage auf die *Timeslices*, d. h. die unterjährigen Zeitperioden, abgebildet.

Für Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen werden jeweils Parameter definiert, welche die Kosten, die technischen Kenngrößen sowie die Beschränkung von Aufbau und Betrieb der Anlagen beschreiben. Kosten umfassen sowohl Investitionskosten (*CapitalCost*, *CapitalCostStorage*, *ExchangeFixedCapitalCost*, *ExchangeVariableCapitalCost*) als auch fixe und variable Betriebskosten (*VariableCost*, *FixedCost*, *ExchangeFixedCost*, *ExchangeVariableCost*). Dabei werden für die Transportinfrastrukturen sowohl distanzabhängige („*Variable*“) als auch distanzunabhängige („*Fixed*“) Kosten

² Die Emissionsbilanzierung kommt im MENA-Fuels-Projekt nicht zur Anwendung, da lediglich der emissionsfreie Anteil des Energiesystems modelliert wird (vgl. → Teilbericht 6).

abgebildet. Eine Differenzierung der Kosten nach Jahr und für die Kosten der Produktionsanlagen und Speicher zusätzlich nach Region ist möglich.

Die technischen Kenngrößen umfassen Angaben zur Lebensdauer, zur Verfügbarkeit der Anlagen sowie zur Effizienz. Für Produktionsanlagen wird die Effizienz über Input- bzw. Outputkoeffizienten (*InputActivityRatio* bzw. *OutputActivityRatio*) abgebildet, anhand dessen das Verhältnis der Inputs bzw. Outputs einer Anlage untereinander berücksichtigt wird. Durch die Modellierung von Alterskohorten können dabei die Input- bzw. Outputkoeffizienten einer Anlage in Abhängigkeit vom Errichtungszeitpunkt der Anlage definiert und damit Effizienzverbesserungen im Anlagenpark über die Zeit explizit berücksichtigt werden. Für Speicher werden Verluste beim Ein- bzw. Ausspeichern anhand der Parameter *TechnologyToStorage* und *TechnologyFromStorage* modelliert. Effizienzverluste beim Transport von Energieträgern werden über den Parameter *ExchangeEfficiency* berücksichtigt, wobei dieser in Abhängigkeit von der Transportdistanz formuliert ist. Der Import eines Energieträgers in eine Region wird dabei entsprechend um die Effizienzverluste reduziert.

Weitere Parameter beschränken den Aufbau bzw. den Betrieb der Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen. Für Produktionsanlagen sind dies exogene Vorgaben zum minimalen bzw. maximalen Aufbau von Kapazitäten bzw. den Betrieb der Anlagen. Es kann sowohl der jährliche Kapazitätszubau (*TotalAnnualMaxCapacityInvest*, *TotalAnnualMinCapacityInvest*) als auch die insgesamt installierte Kapazität (*TotalAnnualMaxCapacity*, *TotalAnnualMinCapacity*) beschränkt werden. Durch letzteres können beispielsweise Potenzialgrenzen von Ressourcen berücksichtigt werden. Der Betrieb von Produktionsanlagen kann durch Vorgaben zu Mindest- bzw. Maximalaktivität restriktiert sein, wobei Vorgaben auf jährlicher Ebene (*TotalTechnologyAnnualActivityUpperLimit* & *TotalTechnologyAnnualActivityLowerLimit*) als auch bezogen auf die gesamte Planungsperiode gemacht werden können (*TotalTechnologyModelPeriodActivityUpperLimit* & *TotalTechnologyModelPeriodActivityLowerLimit*).

Für Speicher kann der Mindestfüllstand in Abhängigkeit von der Speichergroße (*MinStorageCharge*) exogen vorgegeben werden. Der Transport von Energieträgern zwischen verschiedenen Regionen kann durch Nettoimport- bzw. exportvorgaben (*NetExportFrac* & *NetImportFrac*) beschränkt werden. Die Import- bzw. Exportbeschränkungen sind dabei prozentual in Abhängigkeit von der Nachfrage eines Energieträgers formuliert.

Das ESM-I ermöglicht die Modellierung von Emissionen (z. B. CO₂), welche beim Betrieb der Produktionsanlagen entstehen. Parameter zur Modellierung der Emissionen betreffen den Emissionsausstoß von Anlagen (*EmissionActivityRatio*), Strafzahlungen für den Ausstoß von Emissionen (*EmissionsPenalty*) sowie Vorgaben zum maximalen Emissionsausstoß – sowohl auf jährlicher Basis (*AnnualEmissionLimit*) als auch bezogen auf den gesamten Planungshorizont (*ModelPeriodEmissionLimit*). Dabei können auch weitere Emissionen, welche neben den durch die explizit im Modell abgebildeten Produktionsanlagen entstehen,

berücksichtigt werden (*AnnualExogenousEmission*, *ModelPeriodExogenousEmission*).

Tab. 2-1 Parameter des WISEE-ESM-I

Parametername	Beschreibung des Parameters
Globale Parameter	
<i>Timestep</i>	Abstand zwischen den explizit abgebildeten Jahren (im Rahmen der Timestep-Modellierung)
<i>YearSplit</i>	Dauer eines Timeslice (definiert als Anteil am gesamten Jahr)
<i>DiscountRate</i>	Diskontierungssatz
<i>DepreciationMethod</i>	Abschreibungsmethodik
Nachfrageparameter	
<i>SpecifiedAnnualDemand</i>	jährliche Nachfrage nach einem Energieträger, je Energieträger, Jahr, Region
<i>SpecifiedDemandProfile</i>	Anteil der Nachfrage nach einem Energieträger in einem Timeslice, je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
Parameter für die Produktionsanlagen	
<i>CapacityToActivityUnit</i>	Umrechnungsfaktor zwischen Kapazität und Produktionsmenge einer Anlage, je Technologie, Region
<i>CapacityFactor</i>	Kapazitätsfaktor einer Anlage, je Technologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>AvailabilityFactor</i>	jährliche Verfügbarkeit einer Anlage, je Technologie, Jahr, Region
<i>OperationalLife</i>	Lebensdauer einer Anlage, je Technologie, Region
<i>InputActivityRatio</i>	Input-Koeffizient eines Energieträgers, je Energieträger, Technologie, Betriebsmodus ³ , Jahr, Region

³ Manche Technologien können verschiedene Betriebsmodi haben. Wenn eine Technologie verschiedene Input- oder Output-Energieträger hat und die Mischung (d. h. eine beliebige lineare Kombination) dieser Input- oder Output-Energieträger wählen kann, kann jede Mischung als einen separaten Betriebsmodus verbucht werden. Eine KWK-Anlage kann zum Beispiel in einem Betriebsmodus Wärme und in einem anderen Strom erzeugen.

Parametername	Beschreibung des Parameters
<i>OutputActivityRatio</i>	Output-Koeffizient eines Energieträgers, je Energieträger, Technologie, Betriebsmodus, Jahr, Region
<i>CapitalCost</i>	Investitionskosten einer Anlage, je Technologie, Jahr, Region
<i>VariableCost</i>	variable Betriebskosten einer Anlage, je Technologie, Betriebsmodus, Jahr, Region
<i>FixedCost</i>	fixe Betriebskosten einer Anlage, je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalAnnualMaxCapacity</i>	maximal installierbare Kapazität einer Produktionstechnologie pro Jahr (bezieht sich auf die gesamte in einem Jahr verfügbare Kapazität, d. h. in einem Jahr neu installierte Kapazitäten plus in den Vorjahren installierte Kapazitäten), je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalAnnualMinCapacity</i>	minimal zu installierende Kapazität einer Produktionstechnologie pro Jahr (bezieht sich auf die gesamte Kapazität, d. h. in einem Jahr neu installierte Kapazitäten plus in den Vorjahren installierte Kapazitäten), je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalAnnualMaxCapacityInvestment</i>	maximal installierbare Kapazität einer Produktionstechnologie pro Jahr (bezieht sich auf die in einem Jahr neu installierte Kapazität), je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalAnnualMinCapacityInvestment</i>	minimal zu installierende Kapazität einer Produktionstechnologie pro Jahr (bezieht sich auf die in einem Jahr neu installierte Kapazität), je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalTechnologyAnnualActivityUpperLimit</i>	maximales Aktivitätslevel einer Technologie (in einem Jahr), je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalTechnologyAnnualActivityLowerLimit</i>	minimales Aktivitätslevel einer Technologie (in einem Jahr), je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalTechnologyModelPeriodActivityUpperLimit</i>	maximales Aktivitätslevel einer Technologie (in der gesamten Planungsperiode), je Technologie, Region
<i>TotalTechnologyModelPeriodActivityLowerLimit</i>	minimales Aktivitätslevel einer Technologie (in der gesamten Planungsperiode), je Technologie, Region
Parameter für die Speicher	
<i>TechnologyToStorage</i>	Effizienz bei der Einspeicherung, je Technologie ⁴ , Speichertechnologie, Betriebsmodus, Region

⁴ Ein- bzw. Ausspeichereinheiten werden im ESM-I analog zu OSeMOSYS als Produktionsanlagen modelliert.

Parametername	Beschreibung des Parameters
<i>TechnologyFromStorage</i>	Effizienz bei der Ausspeicherung, je Technologie, Speichertechnologie, Betriebsmodus, Region
<i>MinStorageCharge</i>	Mindestspeicherfüllstand, je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>OperationalLifeStorage</i>	Lebensdauer eines Speichers, je Speichertechnologie, Region
<i>CapitalCostStorage</i>	Investitionskosten eines Speichers, je Speichertechnologie, Region, Jahr
<i>e2p</i>	Koeffizient zur Kopplung von speicherbarer Energiemenge und Beladeleistung eines Speichers ⁵ , je Speichertechnologie, Region, Jahr
Parameter für die Transportinfrastruktur (Erweiterung von OSeMOSYS)	
<i>ExchangeRoute</i>	binärer Parameter, welcher angibt, ob die Errichtung einer definierten Transportinfrastruktur zwischen 2 Regionen möglich ist, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr, Region 1, Region 2
<i>ExchangeCapacityToActivity</i>	Umrechnungsfaktor zwischen Kapazität und Transportmenge einer Transportinfrastruktur, je Transporttechnologie
<i>ExchangeEfficiency</i>	Effizienz beim Transport eines Energieträgers, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr
<i>ExchangeDistance</i>	Transportdistanz, je Transporttechnologie, Region 1, Region 2
<i>ExchangeFixedCost</i>	mengenabhängige, distanzunabhängige Transportkosten, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr
<i>ExchangeVariableCost</i>	mengen- und distanzabhängige Transportkosten, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr
<i>ExchangeOperationalLife</i>	Lebensdauer von Transportinfrastrukturen, je Transporttechnologie, Region
<i>ExchangeFixedCapitalCost</i>	distanzunabhängige Investitionskosten von Transportinfrastrukturen, je Transporttechnologie, Jahr, Region
<i>ExchangeVariableCapitalCost</i>	distanzabhängige Investitionskosten von Transportinfrastrukturen, je Transporttechnologie, Jahr, Region

⁵ Der e2p-Koeffizient beschreibt damit die Zeit in Stunden, die ein Speicher für einen kompletten Entladevorgang mit seiner Nennleistung benötigt (E ist Energie; P ist Leistung; E2P ist damit E/P).

Parametername	Beschreibung des Parameters
<i>NetExportFrac</i>	Anteil an der Nachfrage, auf die der Nettoexport eines Energieträgers beschränkt wird, je Energieträger, Jahr, Region
<i>NetImportFrac</i>	Anteil an der Nachfrage, auf die der Nettoimport eines Energieträgers beschränkt wird, je Energieträger, Jahr, Region
Parameter für die Modellierung von Emissionen	
<i>EmissionActivityRatio</i>	Emissionsfaktor einer Technologie (pro Einheit an Aktivität), je Technologie, Betriebsmodus, Emission, Jahr, Region
<i>EmissionsPenalty</i>	Strafzahlung für Emissionen, je Emission, Jahr, Region
<i>AnnualExogenousEmission</i>	Emissionen, welche zusätzlich zu den modellendogen abgebildeten Emissionen zu berücksichtigen sind (definiert pro Jahr), je Emission, Jahr, Region
<i>AnnualEmissionLimit</i>	jährliches Emissionslimit, je Emission, Jahr, Region
<i>ModelPeriodExogenousEmission</i>	Emissionen, welche zusätzlich zu den modellendogen abgebildeten Emissionen zu berücksichtigen sind (definiert für den gesamten Planungshorizont), je Emission, Region
<i>ModelPeriodEmissionLimit</i>	Emissionslimit für den gesamten Planungshorizont, je Emission, Region

Variablen

Die Variablen sind das Ergebnis der Optimierung und stellen damit den Output des Modells dar. Ähnlich zu den Parametern werden Variablen zur Abbildung der Nachfrage, der Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen sowie von Emissionen modelliert.

Eine vollständige Übersicht der Variablen ist in Tab. 2-2 gegeben. Viele der Variablen stellen jedoch lediglich Hilfsvariablen dar bzw. ergeben sich direkt aus anderen Variablen, zum Beispiel durch die Summenbildung über alle *Timeslices*, Betriebsmodi, Technologien, Regionen, Jahre o. ä. (vgl. dazu auch die Ausführungen unten im Abschnitt „Nebenbedingungen“). Daher werden im Folgenden lediglich die Variablen detailliert erläutert, welche die wesentlichen Entscheidungen des Modells repräsentieren.

Variablen für Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen modellieren die installierten Kapazitäten, den Betrieb der Anlagen, Speicher bzw. Transportinfrastrukturen sowie die durch den Aufbau und den Betrieb der installierten Kapazitäten entstehenden Kosten. Das Modell bildet für Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen die in jedem Jahr neu errichteten Kapazitäten differenziert nach Regionen ab (*NewCapacity*, *NewStorageCapacity*, *NewExchangeCapacity*). Unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Anlagen, Speicher bzw. Infrastrukturen kann auf Basis der neu installierten Kapazitäten die in

einem Jahr insgesamt installierte Kapazität (*AccumulatedNewCapacity*, *AccumulatedNewStorageCapacity*, *AccumulatedNewExchangeCapacity*) bestimmt werden. Die in einem Jahr neu installierte Kapazität ist relevant für die durch die Errichtung entstehenden Investitionskosten. Die in einem Jahr insgesamt installierte Kapazität ist beispielsweise relevant für die Begrenzung der Produktion, Speicherung bzw. den Transport und damit für die Betriebskosten im betreffenden Jahr. Bei einer Vielzahl an abgebildeten Technologien, Regionen und Jahren resultiert eine große Anzahl an Variablen, welche die Errichtung von Produktionsanlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen modellieren. Daher wird im Rahmen der Timestep-Modellierung im ESM-I die Errichtung von neuen Anlagen, Speichern bzw. Transportinfrastrukturen nur in jedem x-ten Jahr explizit modelliert. Durch diese Modellierung kann die Komplexität des Planungsproblems wesentlich reduziert werden (vgl. Erläuterungen Kapitel 3).

Variablen zum Betrieb der Produktionsanlagen und Transportinfrastrukturen betreffen die Aktivität dieser (*TotalTechnologyAnnualActivity* bzw. *ExchangeActivity*) sowie sich daraus ergebende weitere Variablen. Weitere Variablen der Produktionsanlagen sind die Menge eingesetzter und produzierter Energieträger (*Use* bzw. *Production*), welche sich aus der Aktivität einer Produktionsanlagen und den Input- bzw. Outputkoeffizienten ergeben. Variablen, die sich direkt aus der Aktivität der Transportinfrastrukturen ergeben, sind *Import* und *Export* – d. h. die in eine Region importierte bzw. aus einer Region exportierte Menge eines Energieträgers.

Variablen zum Betrieb der Speicher beinhalten die Ein- bzw. Ausspeicherung in bzw. aus einem Speicher (*StorageCharge*, *StorageDischarge*). Der Speicherfüllstand (*StorageLevel*) ergibt sich direkt aus der Differenz von *StorageCharge* und *StorageDischarge* und dem Speicherfüllstand aus dem vorangegangenen Timeslice.

Variablen, welche den Betrieb von Produktionsanlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen repräsentieren, werden sowohl pro unterjähriger Zeitperiode (in einem betreffenden Jahr) als auch pro Jahr definiert. Dies soll beispielhaft anhand der Variablen, welche die Produktion von Energieträgern abbilden, erläutert werden. Für die Produktion werden die folgenden Variablen modelliert⁶:

- *Production*
- *ProductionAnnual*
- *RateOfProduction*

Dabei repräsentiert *Production* die Produktion eines Energieträgers pro *unterjähriger Zeitperiode*. *ProductionAnnual* ist die *jährliche* Produktion eines Energieträgers; diese Variable stellt damit die Summe von *Production* über alle unterjährigen Zeitperioden dar. *RateOfProduction* ist eine Hilfsvariable und stellt die Menge eines Energieträgers dar, die in einer unterjährigen Zeitperiode produziert

⁶ Es gibt noch weitere Produktionsvariablen (zum Beispiel zur Differenzierung der Produktion pro Produktionstechnologien). Diese sind zum Verständnis der Definition von Variablen pro unterjähriger Zeitperiode bzw. Jahr nicht notwendig, sodass diese bei der Erläuterung außen vor gelassen werden.

werden würde, wenn letztere das gesamte Jahr andauern würde. *RateOf*-Variablen, welche sowohl zur Abbildung der Produktion als auch der Speicherung definiert werden, werden bei der Formulierung der Kapazitäts-Nebenbedingungen verwendet.⁷

Für den Aufbau und den Betrieb der Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen fallen Investitions- und Betriebskosten an. Diese Kosten sind in weiteren Variablen gespeichert, wobei sich der Wert dieser Variablen direkt aus den installierten Kapazitäten und den Kostenparametern (vgl. Tab. 2-1) ergibt. Der Restwert von Anlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen, deren Lebensdauerende am Ende der Planungsperiode noch nicht erreicht ist, wird in weiteren Variablen gespeichert und entsprechend in der Zielfunktion berücksichtigt.

Durch die Diskontierung der Kosten bzw. Restwerte ergeben sich diskontierte Kosten bzw. Restwerte als weitere Variablen. Die Summe über alle diskontierten Kosten abzüglich der diskontierten Restwerte (*TotalDiscountedCost*) wird im Rahmen der Zielfunktion des ESM-I minimiert (vgl. Erläuterungen im Abschnitt „Zielfunktion“).

Variablen im Rahmen der Emissionsbilanzierung sind die Höhe der ausgestoßenen Emissionen, welche sich direkt aus dem Betrieb der Produktionsanlagen ergeben, sowie Strafzahlungen aufgrund des Emissionsausstoßs.

Tab. 2-2 Variablen des WISEE-ESM-I

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
Variablen zur Abbildung der Nachfrage	
<i>RateOfDemand</i>	Hilfsvariable; Nachfrage nach einem Energieträger pro Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde, je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>Demand</i>	Nachfrage nach einem Energieträger pro Timeslice, je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region

⁷ Da die Modellierung des Transports eine Erweiterung des ESM-I im Vergleich zu OSeMOSYS darstellt, wurde die Logik der *RateOf*-Variablen für die Modellierung des Transports nicht übernommen. Zur Abbildung der Nachfrage wird diese Logik ebenfalls verwendet, wobei es sich dabei nicht ausschließlich um Variablen handelt, sondern teilweise auch um Parameter (vgl. *SpecifiedAnnualDemand*).

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
Variablen zur Abbildung der Produktion	
<i>NewCapacity</i>	in einem Jahr neu installierte Kapazität einer Produktionsanlage, je Technologie, Jahr, Region
<i>AccumulatedNewCapacity</i>	gesamte in einem Jahr installierte Kapazität einer Produktionsanlage (ergibt sich als Summe aus der im betreffenden Jahr neu installierten Kapazität plus der in den Vorjahren installierten Kapazität, sofern das Lebensdauerende der Anlagen nicht erreicht wurde), je Technologie, Jahr, Region
<i>RateOfActivityVintage</i>	Hilfsvariable; repräsentiert die Aktivität einer Technologie einer bestimmten Alterskohorte pro Timeslice, wenn letzterer ein gesamtes Jahr andauern würde, je Technologie, Betriebsmodus, Timeslice, Jahr der Errichtung, Jahr, Region
<i>RateOfTotalActivity</i>	Hilfsvariable; repräsentiert die Aktivität einer Technologie pro Timeslice, wenn letzterer ein gesamtes Jahr andauern würde (summiert für alle Alterskohorten und Betriebsmodi), je Technologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>TotalTechnologyAnnualActivity</i>	jährliche Aktivität einer Technologie, je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalAnnualTechnologyActivityByMode</i>	jährliche Aktivität einer Technologie (differenziert nach Betriebsmodus), je Technologie, Betriebsmodus, Jahr, Region
<i>RateOfProductionByTechnologyByMode</i>	Hilfsvariable; Produktionsmenge eines Energieträgers pro Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde, je Energieträger, Technologie, Betriebsmodus, Timeslice, Jahr, Region
<i>RateOfProductionByTechnology</i>	Hilfsvariable; Produktionsmenge eines Energieträgers pro Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde (summiert über alle Betriebsmodi), je Energieträger, Technologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>RateOfProduction</i>	Hilfsvariable; Produktionsmenge eines Energieträgers pro Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde (summiert über alle Produktionstechnologien und Betriebsmodi), je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>ProductionByTechnology</i>	Produktion eines Energieträgers pro Timeslice, je Energieträger, Technologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>ProductionByTechnologyAnnual</i>	Produktion eines Energieträgers pro Jahr (entspricht der Summe von <i>ProductionByTechnology</i> über alle <i>Timeslices</i>), je Energieträger, Technologie, Jahr, Region

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
<i>Production</i>	Produktion eines Energieträgers pro Timeslice (summiert über alle Technologien), je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>ProductionAnnual</i>	Produktion eines Energieträgers pro Jahr (summiert über alle Technologien), je Energieträger, Jahr, Region
<i>RateOfUseByTechnologyByMode</i>	Hilfsvariable; in einer Produktionstechnologie verwendete Menge eines Energieträgers in einem Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde, je Energieträger, Technologie, Betriebsmodus, Timeslice, Jahr, Region
<i>RateOfUseByTechnology</i>	Hilfsvariable; in einer Produktionstechnologie verwendete Menge eines Energieträgers in einem Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde (summiert über alle Betriebsmodi), je Energieträger, Technologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>RateOfUse</i>	Hilfsvariable; in einer Produktionstechnologie verwendete Menge eines Energieträgers in einem Timeslice, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde (summiert über alle Produktionstechnologien und Betriebsmodi), je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>UseByTechnology</i>	Verwendung eines Energieträgers in einer Produktionsanlage pro Timeslice, je Energieträger, Technologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>UseByTechnologyAnnual</i>	Verwendung eines Energieträgers in einer Produktionsanlage pro Jahr (entspricht der Summe von <i>UseByTechnology</i> über alle <i>Timeslices</i>), je Energieträger, Technologie, Jahr, Region
<i>Use</i>	Verwendung eines Energieträgers in einer Produktionsanlage pro Timeslice (summiert über alle Technologien), je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>UseAnnual</i>	Verwendung eines Energieträgers in einer Produktionsanlage pro Jahr (summiert über alle Technologien), je Energieträger, Jahr, Region
<i>CapitalInvestment</i>	Investitionskosten für die errichteten Produktionskapazitäten, je Technologie, Jahr, Region
<i>DiscountedCapitalInvestment</i>	diskontierte Investitionskosten für die errichteten Produktionskapazitäten, je Technologie, Jahr, Region
<i>SalvageValue</i>	Restwert der errichteten Produktionskapazitäten am Ende der Planungsperiode, je Technologie, Jahr, Region
<i>DiscountedSalvageValue</i>	diskontierter Restwert der errichteten Produktionskapazitäten am Ende der Planungsperiode, je Technologie, Jahr, Region

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
<i>OperatingCost</i>	Betriebskosten pro Jahr für Produktionsanlagen; ergibt sich als Summe aus <i>AnnualVariableOperatingCost</i> und <i>AnnualFixedOperatingCost</i> , je Technologie, Jahr, Region
<i>DiscountedOperatingCost</i>	diskontierte Betriebskosten pro Jahr für Produktionsanlagen, je Technologie, Jahr, Region
<i>AnnualVariableOperatingCost</i>	variable Betriebskosten pro Jahr für Produktionsanlagen, je Technologie, Jahr, Region
<i>AnnualFixedOperatingCost</i>	fixe Betriebskosten pro Jahr für Produktionsanlagen, je Technologie, Jahr, Region
<i>TotalDiscountedCostByTechnology</i>	gesamte diskontierte Kosten einer Produktionsanlage pro Jahr; ergibt sich als Summe aus den Investitionskosten, Betriebskosten und den Strafzahlungen für Emissionen, abzüglich des Restwertes, je Technologie, Jahr, Region
Variablen zur Abbildung der Speicherung	
<i>RateOfStorageCharge</i>	Hilfsvariable; Menge eines Energieträgers, welche in einen Speicher pro Timeslice eingespeichert würde, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde, je Speichertechnologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>RateOfStorageDischarge</i>	Hilfsvariable; Menge eines Energieträgers, welche aus einem Speicher pro Timeslice ausgespeichert würde, wenn letzterer das gesamte Jahr andauern würde, je Speichertechnologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>StorageCharge</i>	Menge eines Energieträgers, welche in einen Speicher pro Timeslice eingespeichert wird, je Speichertechnologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>StorageDischarge</i>	Menge eines Energieträgers, welche aus einem Speicher pro Timeslice ausgespeichert wird, je Speichertechnologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>StorageLevel</i>	Füllstand eines Speichers pro Timeslice, je Speichertechnologie, Timeslice, Jahr, Region
<i>StorageLowerLimit</i>	Mindestkapazität eines Speichers, je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>NewStorageCapacity</i>	in einem Jahr neu installierte Kapazität eines Speichers, je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>AccumulatedNewStorageCapacity</i>	gesamte in einem Jahr installierte Kapazität eines Speichers (entspricht der Summe aus in einem Jahr neu installierten Kapazität eines Speichers plus installierte Kapazitäten aus den Vorjahren, sofern nicht das Lebensdauerende der Speicher erreicht ist), je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>CapitalInvestmentStorage</i>	Investitionskosten der errichteten Speicher, je Speichertechnologie, Jahr, Region

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
<i>DiscountedCapitalInvestmentStorage</i>	diskontierte Investitionskosten der errichteten Speicher, je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>SalvageValueStorage</i>	Restwert der errichteten Speicher am Ende der Planungsperiode, je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>DiscountedSalvageValueStorage</i>	diskontierter Restwert der errichteten Speicher am Ende der Planungsperiode, je Speichertechnologie, Jahr, Region
<i>TotalDiscountedStorageCost</i>	diskontierte Investitionskosten abzüglich des Restwertes am Ende der Planungsperiode der errichteten Speicher, je Speichertechnologie, Jahr, Region
Variablen zur Abbildung des Transports (Erweiterung von OSeMOSYS)	
<i>NewExchangeCapacity</i>	in einem Jahr neu errichtete Transportinfrastrukturkapazität, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr, Region 1, Region 2
<i>AccumulatedNewExchangeCapacity</i>	gesamte Transportinfrastrukturkapazität in einem Jahr (ergibt sich aus der in dem betreffenden Jahr neu errichteten Kapazität plus errichtete Kapazitäten aus den Vorjahren, deren Lebensdauerende noch nicht erreicht ist), je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr, Region 1, Region 2
<i>ExchangeActivity</i>	Aktivität einer Transportinfrastruktur zwischen 2 Regionen pro Timeslice, je Energieträger, Transporttechnologie, Timeslice, Jahr, Region 1, Region 2
<i>ExchangeActivityAnnualByTech</i>	Aktivität einer Transportinfrastruktur zwischen 2 Regionen pro Jahr, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr, Region 1, Region 2
<i>ExchangeActivityAnnual</i>	Aktivität einer Transportinfrastruktur zwischen 2 Regionen pro Jahr (summiert über alle Transporttechnologien), je Energieträger, Jahr, Region 1, Region 2
<i>Import</i>	in eine Region importierte Menge eines Energieträgers pro Timeslice, je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>ImportAnnual</i>	in eine Region importierte Menge eines Energieträgers pro Jahr, je Energieträger, Jahr, Region
<i>Export</i>	aus einer Region exportierte Menge eines Energieträgers pro Timeslice, je Energieträger, Timeslice, Jahr, Region
<i>ExportAnnual</i>	aus einer Region importierte Menge eines Energieträgers pro Jahr, je Energieträger, Jahr, Region

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
<i>ExchangeCapitalInvestment</i>	Investitionskosten zur Errichtung der Transportinfrastrukturkapazitäten, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr, Region 1, Region 2
<i>ExchangeCapitalInvestmentByRegion</i>	Investitionskosten zur Errichtung der Transportinfrastrukturkapazitäten (die Investitionskosten für die Transportinfrastrukturkapazitäten werden der Region zugeordnet, zu der die Transportinfrastruktur führt), je Transporttechnologie, Jahr, Region
<i>DiscountedExchangeCapitalInvestment</i>	diskontierte Investitionskosten zur Errichtung der Transportinfrastrukturkapazitäten, je Transporttechnologie, Jahr, Region
<i>ExchangeSalvageValue</i>	Restwert der Transportinfrastrukturkapazitäten am Ende der Planungsperiode, je Energieträger, Transporttechnologie, Jahr, Region 1, Region 2
<i>ExchangeSalvageValueByRegion</i>	Restwert der Transportinfrastrukturkapazitäten am Ende der Planungsperiode (der Restwert für die Transportinfrastrukturkapazitäten wird der Region zugeordnet, zu der die Transportinfrastruktur führt), je Transporttechnologie, Jahr, Region
<i>DiscountedExchangeSalvageValue</i>	diskontierter Restwert der Transportinfrastrukturkapazitäten am Ende der Planungsperiode, je Transporttechnologie, Jahr, Region
<i>ExchangeCost</i>	Summe der mengenabhängigen Transportkosten pro Jahr (Kosten werden der Region, in die der Transport erfolgt, zugeschlagen), je Energieträger, Jahr, Region
<i>DiscountedExchangeCostByFuel</i>	Summe der diskontierten, mengenabhängigen Transportkosten pro Jahr, je Energieträger, Jahr, Region
<i>DiscountedExchangeCost</i>	Summe der diskontierten, mengenabhängigen Transportkosten pro Jahr (summiert über alle Energieträger), je Jahr, Region
Weitere Variablen zur Abbildung von Kosten	
<i>TotalDiscountedCost</i>	gesamte diskontierte Zahlungen pro Jahr; ergibt sich als Summe aus Investitions- und Betriebskosten der Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen und den Strafzahlungen für Emissionen, abzüglich des Restwertes von Produktionsanlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen am End der Planungsperiode, je Jahr, Region
<i>ModelPeriodCostByRegion</i>	gesamte diskontierte Zahlungen (entspricht der Summe von <i>TotalDiscountedCost</i> über alle Jahre), je Region

Name der Variablen	Beschreibung der Variablen
Variablen zur Abbildung von Emissionen	
<i>AnnualTechnologyEmissionByMode</i>	jährliche Emissionen einer Produktionsanlage, je Emission, Technologie, Betriebsmodus, Jahr, Region,
<i>AnnualTechnologyEmission</i>	jährliche Emissionen einer Produktionsanlage, je Emission, Technologie, Jahr Region
<i>AnnualTechnologyEmissionPenaltyByEmission</i>	Strafzahlungen für das Ausstoßen von Emissionen, je Emission, Technologie Jahr
<i>AnnualTechnologyEmissionsPenalty</i>	Strafzahlungen für das Ausstoßen von Emissionen (summiert über alle Emissionen), je Technologie, Jahr
<i>DiscountedTechnologyEmissionsPenalty</i>	diskontierte Strafzahlungen für das Ausstoßen von Emissionen (summiert über alle Emissionen), je Technologie, Jahr
<i>AnnualEmissions</i>	jährliche Emissionen einer Produktionsanlage (summiert über alle Technologien und Betriebsmodi), je Emission, Jahr, Region
<i>ModelPeriodEmissions</i>	Gesamtsumme an Emissionen pro Planungsperiode; ergibt sich als Summe aus modellendogen ermittelten Emissionen <i>AnnualEmissions</i> und modellexogen vorgegebenen <i>AnnualExogenousEmission</i> , je Emission, Region

Zielfunktion

Die Zielfunktion des ESM-I minimiert die diskontierten Gesamtkosten des Energiesystems (*ModelPeriodCostByRegion*). Die Gesamtkosten umfassen die Investitions- und Betriebskosten der Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen abzüglich ihres Restwertes plus Strafzahlungen für den Ausstoß von Emissionen für alle modellierten Regionen und Jahre.

Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen des ESM-I beschreiben und beschränken den Lösungsraum des Optimierungsmodells. Die Nebenbedingungen können in die folgenden vier Kategorien eingeteilt werden:

- Variablendefinition
- Kapazitätsrestriktionen
- Massen- und Energiebilanzen
- Emissionsbilanzierung

Im Rahmen der **Variablendefinition** werden einzelne Variablen zueinander in Beziehung gebracht. Beispielsweise entspricht die gesamte in einem Jahr installierte Kapazität einer Produktionstechnologie der in dem Jahr neu installierten Kapazität plus die neu installierte Kapazität in den Vorjahren, sofern das Lebensdauerende der Anlagen noch nicht erreicht ist. Es existieren viele weiterer solcher

Nebenbedingungen. Der Zusammenhang dieser Variablen wurde bereits oben im Rahmen der Beschreibung der Variablen erläutert (vgl. Tab. 2-2), sodass im Folgenden auf die Beschreibungen von Kapazitätsrestriktionen, Massen-/Energiebilanzen und Emissionsbilanzierung fokussiert wird.

Kapazitätsrestriktionen beschränken den Ausbau und den Betrieb von Produktionsanlagen, Speichern und Transportinfrastrukturen. Ihr Betrieb ist durch ihre installierten Kapazitäten in der entsprechenden Region beschränkt, wobei die installierten Kapazitäten Variablen des Modells darstellen (vgl. Erläuterungen in dem Abschnitt „Variablen“). Für Produktionsanlagen wird insbesondere auch die Nichtverfügbarkeit von Produktionsanlagen, z. B. aufgrund von Wartungsarbeiten, bei den Kapazitätsrestriktionen mit berücksichtigt.

Der Betrieb der Produktionsanlagen ist weiterhin durch Vorgaben zur Mindest- bzw. Maximalaktivität – sowohl bezogen auf ein Jahr als auch bezogen auf die gesamte Planungsperiode – beschränkt. Der Betrieb von Ein- und Ausspeichereinheiten ist weiterhin durch exogene Vorgaben zu maximalen Ein- und Ausspeicherraten begrenzt. Der Betrieb von Transportinfrastrukturen und damit die transportierte Menge an Energieträgern ist durch exogene Vorgaben zu maximalen Import- bzw. Exportmengen einzelner Regionen restriktiert (vgl. dazu auch Erläuterungen unter dem Abschnitt „Parameter“).

Darüber hinaus wird der Ausbau von Produktionsanlagen durch exogene Vorgaben zu Mindest- bzw. Maximalausbau begrenzt. Dabei kann sowohl der jährlich neue Invest in Produktionsanlagen als auch die insgesamt installierte Kapazität einer Produktionstechnologie restriktiert werden. Anhand jährlicher Investvorgaben können beispielsweise Mindest- oder Maximalausbauraten von Technologien vorgegeben werden. Restriktion von insgesamt installierten Kapazitäten können Potenzialgrenzen, zum Beispiel von Wind- und Solarenergie, widerspiegeln.

Massen- und Energiebilanzen stellen sicher, dass die physikalischen Gesetzmäßigkeiten bei der Transformation, der Speicherung und dem Transport von Energieträgern eingehalten werden. Die grundlegende Massen- und Energiebilanz stellt sicher, dass die Summe aus Produktion und Import eines Energieträgers in einer Region, in einem Timeslice und in einem Jahr mindestens die Summe aus Verwendung in weiteren Prozessschritten, den Export in andere Regionen und die Deckung der Nachfrage nach diesem Energieträger deckt.

Für die Transformation der Energieträger in den Produktionsanlagen wird anhand von Nebenbedingungen sichergestellt, dass die Verwendung bzw. die Produktion von Energieträgern in einer Produktionsanlage der Aktivität der betreffenden Anlage multipliziert mit einem Input- bzw. Outputkoeffizienten entspricht. Analog wird für den Transport im Rahmen weiterer Nebenbedingungen die Aktivität einer Transportinfrastruktur mit dem Import bzw. Export eines Energieträgers in Zusammenhang gebracht. Effizienzverluste beim Transport werden bei der importierten Menge eines Energieträgers entsprechend berücksichtigt.

Im Rahmen der Nebenbedingungen zur Abbildung der Speicherung von Energieträgern wird garantiert, dass die gespeicherte Energiemenge in einem Speicher, in einer Region, in einem Timeslice und in einem Jahr der in dieser Zeitperiode

eingespeicherten Energie minus der ausgespeicherten Energie plus dem Speicherfüllstand des vorherigen *Timeslices* entspricht. Dabei werden die Speicher-Nebenbedingungen zyklisch formuliert, d. h. der Speicherfüllstand zu Beginn eines Jahres entspricht dem Speicherfüllstand zum Ende eines Jahres. Dem Modell ist jedoch freigestellt, wie hoch der Speicherfüllstand zu Beginn bzw. zum Ende eines Jahres ist (wobei er nicht negativ sein darf). Darüber hinaus wird die Speicherung auf eine unterjährige Speicherung begrenzt, um die Modellkomplexität zu reduzieren (vgl. Kapitel 3).

Im Rahmen der **Emissionsbilanzierung** wird die Einhaltung der modellexogen vorgegeben Emissionsminderungsziele sichergestellt.

3 Anpassungen des Open Source Frameworks OSeMOSYS

OSeMOSYS ist ein umfassendes Framework zur Energiesystemplanung (Royal Institute of Technology (KTH) et al., 2022). Jedoch sind einige Anpassungen der mathematischen Formulierung des Frameworks notwendig, um die Anforderungen an die Modellrechnungen im Rahmen des MENA-Fuels-Projektes erfüllen zu können.

Folgende wesentliche Anpassungen wurden vorgenommen:

- **Differenzierte Abbildung des Transports:** In OSeMOSYS wird der Austausch von Energieträgern zwischen verschiedenen Regionen vereinfacht abgebildet; Kapazitäten und Technologien (z. B. Pipeline, Tanker) von Transportinfrastrukturen werden nicht explizit modelliert. Kosten, die mit dem Aufbau und Betrieb von Transportinfrastruktur verbunden sind, werden ebenfalls nicht abgebildet. Es wird lediglich die Menge ausgetauschter Energieträger in der Massen- und Energiebilanz berücksichtigt. Für das ESM-I wird diese vereinfachte Abbildung erweitert: Die Investition und der Betrieb von Transportinfrastrukturen mit den damit verbundenen Investitions- und Betriebskosten werden explizit abgebildet. Der Transport von Energieträgern ist nur möglich, wenn zwischen den entsprechenden Regionen die für den Transport des entsprechenden Energieträgers geeignete Infrastruktur aufgebaut bzw. betrieben wird. Darüber hinaus kann der Import bzw. Export durch modellexogene Vorgaben begrenzt werden, wobei diese Modelleigenschaft im MENA-Fuels-Projekt nicht zur Anwendung kommt. Transportinfrastrukturen werden somit im ESM-I abgebildet als Austauschkapazitäten zwischen zwei Regionen, die längenspezifische, leistungs- und auslastungsabhängige Kosten haben.
- **Berücksichtigung von Alterskohorten bei Produktionsanlagen:** OSeMOSYS berücksichtigt explizit keine Alterskohorten für Produktionsanlagen. Da sich jedoch wichtige techno-ökonomische Parameter, wie zum Beispiel die Effizienz von Produktionsanlagen, über die Zeit ändern können, sollte modellseitig der Investitionszeitpunkt explizit berücksichtigt werden. Dies ist durch die Modellierung von Alterskohorten, wie sie im ESM-I berücksichtigt sind, möglich. Dies wiederum geht mit einer zusätzlichen Komplexität für die Abbildung residualer (bestehender) Kapazitäten von Speichern und Produktionsanlagen einher, auf die im Kontext dieses Projektes verzichtet wurde.
- **Keine Differenzierung zwischen Season, DayType und DailyTimeBracket:** OSeMOSYS differenziert zwischen *Season*, *DayType* und *DailyTimeBracket*, um zeitliche Schwankungen des Energieangebots und der Energienachfrage auf verschiedenen zeitlichen Ebenen abbilden zu können. Im Rahmen des ESM-I wird die Modellierung von Zeitperioden vereinfacht und keine Differenzierung zwischen *Season*, *DayType* und *DailyTimeBracket* vorgenommen. Im ESM-I werden damit hinsichtlich der zeitlichen Differenzierung lediglich Jahre und *Timeslices* modelliert. Die Abbildung von Jahren ermöglicht die Berücksichtigung von langfristigen Entwicklungen über Jahrzehnte. *Timeslices* repräsentieren unterjährige Zeitperioden und erlauben damit die Abbildung von unterjährigen Schwankungen von Energieangebot und -nachfrage. Die Vereinfachung der zeitlichen Abbildung im ESM-I reduziert die Komplexität des Planungsproblems. Gleichzeitig ist sie detailliert genug, um die strategische Modellierung

und Bewertung von Energiesystemen unter Berücksichtigung von unterjähriger Schwankungen von Energieangebot und -nachfrage zu ermöglichen. Für tiefergehende Fragestellungen im Rahmen der operativen Planung, welche eine differenzierte zeitliche Auflösung notwendig machen, kann das Dispatch-Modul ESM-D genutzt werden (beschrieben in Nebel et al., 2020). Dieses kommt im Rahmen des MENA-Fuels-Projektes aufgrund der strategisch ausgerichteten Fragestellungen jedoch nicht zum Einsatz.

- **Anpassungen der Abbildung der Speicherung von Energieträgern:** Die fehlende Differenzierung zwischen Season, DayType und DailyTimeBracket ermöglicht es, die Abbildung der Speicherung im ESM-I im Vergleich zu OSeMOSYS anzupassen und zu vereinfachen. Im ESM-I wird eine Speicherung zwischen *Timeslices* und damit eine unterjährige Speicherung von Energieträgern abgebildet. Wie in Kapitel 2 erläutert, werden die Speichergleichungen dabei zyklisch formuliert. Durch diese Modellierung wird sichergestellt, dass Erneuerbare Energien (EE)-Anlagen, welche im ersten modellierten Timeslice nicht oder nur geringfügig Energie erzeugen können, modell-seitig nicht benachteiligt werden. Darüber hinaus wird die Speicherung damit auf eine unterjährige Speicherung begrenzt, eine Speicherung zwischen den Jahren ist nicht möglich. Dies reduziert die Komplexität des Modells wesentlich und entspricht gleichzeitig einer realitätsnahen Abbildung, da auch in der Praxis erneuerbare Energieträger vor allem auf einer kurzfristigen bis saisonalen Ebene gespeichert werden.
- **Berücksichtigung von Verlusten bei der Ein- bzw. Ausspeicherung:** OSeMOSYS berücksichtigt keine Verluste bei der Speicherung. Im ESM-I hingegen werden Verluste bei der Ein- bzw. Ausspeicherung von Stoffen bzw. Energieträgern berücksichtigt. Dafür werden die binären OSeMOSYS-Parameter *TechnologyToStorage* und *TechnologyFromStorage* im ESM-I als nicht-negative, reelle Zahl definiert, anhand derer die Verluste abgebildet werden können.
- **Timestep-Modellierung:** OSeMOSYS modelliert alle Jahre innerhalb einer Planungsperiode explizit. Diese Modellierung bedeutet eine hohe Anzahl an Variablen und damit eine hohe Modellkomplexität. Im Rahmen des ESM-I wird eine sogenannte Timestep-Modellierung eingeführt. Bei der Timestep-Modellierung wird nur jedes x-te Jahr explizit in Modell abgebildet, wobei die Anzahl der modellierten Jahre fallstudien-spezifisch angepasst werden kann. Damit ist eine Investition in Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen nur in den explizit modellierten Jahren möglich. Für ihren Betrieb in den nicht modellierten Jahren wird implizit angenommen, dass er dem Betrieb der explizit modellierten Jahre entspricht. Dabei werden die variablen und fixen Betriebskosten in den modellierten Jahren entsprechend x-fach berücksichtigt, um kostenseitig den Betrieb in den nicht modellierten Jahren zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden die Diskontierung und die Berechnung des Restwertes im Modell angepasst, damit sie konsistent zur Timestep-Modellierung sind. Die Timestep-Modellierung reduziert durch die geringere Anzahl an modellierten Jahren die Variablenanzahl und damit die Komplexität des Modells wesentlich.

- **Keine Abbildung von Reservekapazitäten und Zielvorgaben zur EE-Erzeugung:** OSeMOSYS ermöglicht die Abbildung von Reservekapazitäten und Zielvorgaben zu EE-Erzeugungsmengen. Diese Modellfeatures werden jedoch im Rahmen des MENA-Fuels-Projektes bzw. anderen Arbeiten mit dem ESM-I (bisher) nicht genutzt, sodass von einer Beschreibung dieser im Rahmen dieses Berichtes abgesehen wird.

4 Ansätze zur Reduktion der Modellkomplexität

Zur Modellierung und Bewertung der langfristigen Versorgungspfade Deutschlands und Europas mit erneuerbarem Strom und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen ist eine Vielzahl an Technologien, Zeitperioden und Regionen abzubilden. Entsprechend komplex ist das resultierende Optimierungsproblem. Daher wurden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der Komplexität umgesetzt. Zum einen wurde die mathematische Formulierung des ESM-I angepasst. Diese Anpassungen sind detailliert in Kapitel 3 detailliert beschrieben. Daher werden sie an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt, ohne sie im Detail zu erläutern. Konkret wurden folgende Anpassungen in der mathematischen Formulierung vorgenommen:

- 1 | Keine Differenzierung zwischen *Season*, *DayType* und *DailyTimeBracket*; Modellierung lediglich von Jahren und unterjährigen Zeitperioden (*Timeslices*)
- 2 | Formulierung von zyklischen Speichergleichungen, durch welche die Speicherung auf eine unterjährige Speicherung begrenzt wird

Zum anderen wird die Anzahl der zu modellierenden Zeitperioden (Reduktion der zeitlichen Komplexität) und Regionen (Reduktion der räumlichen Komplexität) reduziert, um die Komplexität weiter zu reduzieren. Diese Maßnahmen zur Komplexitätsreduktion werden im Folgenden näher erläutert.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, wird auf der zeitlichen Ebene zwischen Jahren und *Timeslices* differenziert, um sowohl langfristige Entwicklungen als auch kurzfristige Schwankungen in Energieangebot und -nachfrage berücksichtigen zu können. Die Reduktion der zeitlichen Komplexität setzt an beiden zeitlichen Ebenen an: Zum einen werden nur Stützjahre, das heißt jedes x -te Jahr, und nicht alle Jahre innerhalb einer Planungsperiode explizit modelliert (vgl. dazu auch die Erläuterungen zur Timestep-Modellierung in Kapitel 3). Zum anderen wird die Anzahl der unterjährigen Zeitschritte durch eine Aggregation der Stunden reduziert. Die temporale Aggregation erfolgt für die Nachfrage und die solaren Strahlungsdaten durch die Auswahl von Datenpunkten aus dem gesamten Jahresverlauf in regelmäßigen Abständen. Für eine zeitliche Auflösung von 25 Stunden beispielsweise wird jede 350. Stunde berücksichtigt (entspricht einem zweiwöchigen Rhythmus). Durch die Abstände in der Auswahl der Datenpunkte ergibt sich eine synthetische Tageszeitreihe (da jeweils Stunden im Abstand $x \cdot 24 + 1$ genutzt werden). In dieser sind die typischen untertägigen Schwankungen und auch, wenn auch bei geringer zeitlicher Auflösung nur sehr stilisiert, die Saisonalität der Einspeisung bzw. Last repräsentiert.

Für die Einspeisung von Windenergie wird eine abweichende Aggregationsmethode genutzt: Es wird jeweils dasjenige zusammenhängende Zeitintervall aus der Jahreszeitreihe genutzt, das die höchste Spreizung zwischen maximaler und minimaler Verfügbarkeit der Potenziale aufweist, um sicherzustellen, dass Fluktuationen hinreichend abgebildet sind. Durch eine Skalierung der aggregierten Zeitreihen wird sichergestellt, dass die Volllaststunden der aggregierten Zeitreihen derjenigen der nicht aggregierten Ursprungszeitreihen entsprechen. Die beiden Ansätze zur Reduktion der zeitlichen Komplexität reduzieren die Anzahl der Variablen und der Randbedingungen und damit die Komplexität des Modells wesentlich.

Die räumliche Komplexität wird durch ein Clustering von einzelnen Ländern zu größeren Regionen reduziert. Für das Regionen-Clustering werden die länderspezifischen Eingangsdaten des Modells aggregiert. Dabei kann fallstudien-spezifisch angepasst werden, welche Länder zu Clustern gruppiert werden und anhand welcher Logik (Mittelwerte, Summen, gewichtete Mittel, etc.) das Clustering der Parameter erfolgen soll. Die Zuordnung der Länder in Cluster, die im Projekt MENA-Fuels vorgenommen wurde, ist in Kapitel 2 in → *Teilbericht 6* dokumentiert. Die Parameter werden wie folgt geclustert: Daten zur Nachfrage und zu den maximal bzw. minimal installierbaren Kapazitäten werden für alle Länder innerhalb eines Clusters summiert. Ebenfalls werden die möglichen ExchangeRoutes im Rahmen des Clusterings summiert. Das Nachfrageprofil (*SpecifiedDemandProfile*) wird anhand des gewichteten Mittelwertes – mit der Nachfrage als Gewichtungsfaktor – geclustert. Alle weiteren Parameter, welche länderspezifisch formuliert werden (dies betrifft insbesondere die techno-ökonomischen Parameter der Produktionsanlagen, Speicher und Transportinfrastrukturen sowie die Transportdistanzen), werden anhand des arithmetischen Mittels geclustert.

Durch das Clustering einzelner Länder zu Regionen kann die Anzahl der Variablen und damit die Komplexität des Modells wesentlich reduziert werden. Um länderspezifische Ergebnisse zu erhalten, werden die Modellergebnisse im Rahmen eines Post-Processings wieder auf einzelne Länder verteilt; dabei erfolgt die Disaggregation anhand der folgenden Methodik: Die in den Modellergebnissen ausgewiesenen Stromerzeugungsmengen und Kapazitäten von EE-Anlagen werden für jede Kostenpotenzialkategorie (KP-Kategorie, siehe Kapitel 3 in → *Teilbericht 6*) vollständig dem Land innerhalb eines Clusters mit dem besten Kapazitätsfaktor in der betreffenden KP-Kategorie (im betreffenden Jahr) zugeordnet. Ist die Kapazität einer KP-Kategorie gemäß den Modellergebnissen größer als die maximal installierbare Kapazität des Landes mit dem besten Kapazitätsfaktor, wird die verbleibende Stromerzeugung bzw. EE-Kapazität dem Land mit dem zweitbesten Kapazitätsfaktor zugeordnet. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis die gesamte Stromerzeugung bzw. EE-Anlagenkapazität gemäß Modellergebnissen auf die Länder innerhalb eines Clusters aufgeteilt sind. Auf Basis dieser Zuordnung wird für jedes Land und jedes Jahr der Anteil der gesamten Stromerzeugung (d. h. summiert über alle KP-Kategorien) an der gesamten Stromerzeugung des gesamten Clusters im betreffenden Jahr ermittelt. Dieser Anteil wird anschließend als Verteilungsschlüssel für die Berechnung länderspezifischer Produktionsmengen und Anlagenkapazitäten der gasförmigen und flüssigen Brenn- und Kraftstoffe sowie Transportmengen und Kapazitäten der Transportinfrastrukturen genutzt⁸.

⁸ Bei der Berechnung länderspezifischer Transportmengen und Transportinfrastrukturkapazitäten wird zusätzlich geprüft, welche Energiemengen lediglich durch ein Cluster durchgeleitet, aber nicht in diesem produziert werden (d. h. das Cluster fungiert als Transitregion). Diese Transit-Mengen werden annahmegemäß einem Land je Cluster zugeordnet.

5 Literaturverzeichnis

Zitierte Literatur

- Howells, M., Rogner, H., Strachan, N., Heaps, C., Huntington, H., Kypreos, S., Hughes, A., Silveira, S., DeCarolis, J., Bazillian, M., Roehrl, A. (2011). OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy*, 39(10), 5850–5870. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.033>
- Nebel, A., Krüger, C., Janßen, T., Saurat, M., Kiefer, S., Arnold, K. (2020). Comparison of the Effects of Industrial Demand Side Management and Other Flexibilities on the Performance of the Energy System. *Energies*, 13(17), 4448. <https://doi.org/10.3390/en13174448>
- Royal Institute of Technology (KTH), International Atomic Energy Agency, Energy Institute, University College London, Stockholm Environmental Institute (SEI), Stanford University, Paul Scherrer Institute, Energy Research Centre, University of Cape Town, North Carolina State University, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2022). Structure of OSeMOSYS. <https://osemosys.readthedocs.io/en/latest/manual/Structure%20of%20OSeMOSYS.html>

Teilberichte

- Acosta-Fernández, J., Viebahn, P., Hanke, T., Block, S. (2023). Gesamtwirtschaftliche Effekte von Investitionen zur Versorgung Deutschlands mit Wasserstoff und synthetischen Energieträgern aus der MENA-Region. MENA-Fuels: Teilbericht 13 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Braun, J., Kern, J., Scholz, Y., Hu, W., Moser, M., Schillings, C., Simon, S., Ersoy, S. R., Terrapon-Pfaff, J. (2022). Technische und risikobewertete Kosten-Potenzial-Analyse der MENA-Region. MENA-Fuels: Teilbericht 10 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Doré, L., Krüger, C., Janßen, T. (2022). Weitere Szenarioanalysen: Berücksichtigung von Investitionsrisiken und Sensitivitäten der Basisszenarien. MENA-Fuels: Teilbericht 7 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Ersoy, S. R., Terrapon-Pfaff, J., Viebahn, P., Pregger, T., Braun, J. (2022). Synthese der Kurzstudien für Jordanien, Marokko und Oman. MENA-Fuels: Teilbericht 11 des Wuppertal Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Horst, J., Klann, U. (2022). MENA-Fuels—Analyse eines globalen Marktes für Wasserstoff und synthetische Energieträger hinsichtlich künftiger Handelsbeziehungen. MENA-Fuels: Teilbericht 12 des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Jülich, A., Zelt, O. (2022). Ökobilanzen für synthetisches Kerosin—Vergleich von Produktionsrouten in MENA und Deutschland. MENA-Fuels: Teilbericht 2 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Krüger, C., Doré, L. (2022). Nachfrageszenarien – Storylines und Herleitung der Entwicklung der Nachfrage nach Synfuels und Grundstoffen. MENA-Fuels: Teilbericht 5 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Krüger, C., Doré, L., Janßen, T. (2022). Basisszenarien – Ergebnisse und Infrastrukturauswertung. MENA-Fuels: Teilbericht 6 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Pregger, T. (2022). Szenarien zur Eigenbedarfsanalyse für die MENA-Länder. MENA-Fuels: Teilbericht 9 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Saurat, M., Doré, L., Janßen, T., Kiefer, S., Krüger, C., Nebel, A. (2022). Beschreibung des Energieversorgungsmodells WISEE-ESM-I. MENA-Fuels: Teilbericht 4 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

- Terrapon-Pfaff, J., Prantner, M., Ersoy, S. R. (2022). Risikobewertung und Risikokostenanalyse der MENA-Region. MENA-Fuels: Teilbericht 8 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, J., Doré, L., Krüger, C., Zelt, O., Pregger, T., Braun, J., Klann, U. (2022a). Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels. Teilbericht 14 des Wuppertal Instituts, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, J., Doré, L., Krüger, C., Zelt, O., Pregger, T., Braun, J., Klann, U. (2022b). Synthesis and courses of action. Report on results of the MENA-Fuels project. Sub-report 14 to the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Wuppertal Institut, German Aerospace Center (DLR), Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (Institute for Future Energy and Material Flow Systems, IZES).
- Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, L., Doré, L., Krüger, C., Zelt, O., Pregger, T., Braun, J., Klann, U. (2022c) : synthèse et pistes d'action. Rapport sur les résultats du projet MENA-Fuels. Sous-rapport 14 au ministère fédéral de l'Économie et de la Protection du climat (BMWK). Wuppertal Institut, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES).
- Zelt, O., Kobiela, G., Ortiz, W., Scholz, A., Monnerie, N., Rosenstiel, A., Viebahn, P. (2020). Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe. MENA-Fuels: Teilbericht 3 des Wuppertal Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Zelt, O., Scholz, A., Viebahn, P. (2021). Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien. MENA-Fuels: Teilbericht 1 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Überblick über die Teilberichte in MENA-Fuels

Alle Teilberichte können über die folgende Website heruntergeladen werden:

www.wupperinst.org/MENA-Fuels/

Teilprojekt A.I: Technologiebewertung für synthetische Kraftstoffe

- 1 Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien
- 2 Ökobilanzen für synthetisches Kerosin – Vergleich von Produktionsrouten in MENA und Deutschland
- 3 Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe

Teilprojekt A.II: Potenzial- und Infrastrukturanalyse für EE-Strom, Wasserstoff und synthetische Folgeprodukte

- 4 Beschreibung des Energieversorgungsmodells WISEE-ESM-I
- 5 Nachfrageszenarien – Storylines und Herleitung der Entwicklung der Nachfrage nach Synfuels und Grundstoffen
- 6 Basisszenarien – Ergebnisse und Infrastrukturauswertung
- 7 Weitere Szenarioanalysen: Berücksichtigung von Investitionsrisiken und Sensitivitäten der Basisszenarien
- 8 Risikobewertung und Risikokostenanalyse der MENA-Region

Teilprojekt B.I: Analyse der Exportpotenziale in den MENA-Ländern

- 9 Szenarien zur Eigenbedarfsanalyse für die MENA-Länder
- 10 Technische und risikobewertete Kosten-Potenzial-Analyse der MENA-Region
- 11 Synthese der Kurzstudien für Jordanien, Marokko und Oman

Teilprojekt B.II: Künftige Märkte, Handelsprodukte und Wertschöpfungsketten

- 12 MENA-Fuels – Analyse eines globalen Marktes für Wasserstoff und synthetische Energieträger hinsichtlich künftiger Handelsbeziehungen
- 13 Gesamtwirtschaftliche Effekte von Investitionen zur Versorgung Deutschlands mit Wasserstoff und synthetischen Energieträgern aus der MENA-Region

Teilprojekt B.III: Synthese und Handlungsoptionen

- 14 (DE) Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels
- 14 (EN) Synthesis and courses of action – Report on results of the MENA-Fuels project
- 14 (FR) Synthèse et pistes d'action – Rapport sur les résultats du projet MENA-Fuels

Die Zukunft der Mobilität in Deutschland und der EU bietet ein vielfältiges Portfolio an Technologien und Lösungen. Neben der Elektromobilität ist auch der Einsatz synthetischer Kraftstoffe eine denkbare Lösung.

Die Herstellung großer Mengen synthetischer Kraftstoffe (und Feedstocks) benötigt erhebliche Mengen an preisgünstigen erneuerbaren Energien. Insbesondere die sonnen- und windreichen Länder der MENA-Region (Nordafrika und Naher Osten) mit ihren großen erneuerbaren Energiepotenzialen bieten sich als Standorte zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe und ihrer Vorprodukte an. Darüber hinaus bestehen zu vielen Ländern bereits Handelsbeziehungen und Infrastrukturen, auf die aufgebaut werden kann.

Aber welche Potenziale sind in den einzelnen Staaten verfügbar? Zu welchen Kosten stehen entsprechende Ressourcen zur Verfügung? Welche Transportstrukturen werden benötigt? Welche Auswirkungen hat ein Import auf die Wertschöpfung sowohl in Deutschland als auch in den MENA-Staaten? Welches Interesse besteht in den Staaten der MENA-Region selbst, ihre erneuerbaren Energiepotenziale für die inländische Versorgung, aber auch für den Export zu nutzen? Mit welchen Mitbewerbern ist außerhalb von MENA und EU zu rechnen?

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen hat das Projekt MENA-Fuels analysiert, in welchem Umfang die MENA-Region ein strategisch wichtiger Handelspartner bei der Versorgung Deutschlands (und der EU) mit synthetischen Kraftstoffen oder deren Vorprodukten sein kann.

www.wupperinst.org/MENA-Fuels/

