

**Universität Stuttgart**

Institut für Akustik und Bauphysik  
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung

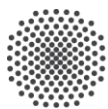
**Abschlussbericht zum Projekt  
"Ressourcenbedarf für die  
Energiewende:  
Interdisziplinäre Bewertung  
von Szenarien für die  
Bereitstellung von Strom und  
Wärme"**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Abschlussbericht zum Projekt InteRessE "Ressourcenbedarf für die Energiewende: Interdisziplinäre Bewertung von Szenarien für die Bereitstellung von Strom und Wärme"

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart, Institut für Akustik und Bauphysik  
Förderkennzeichen: 03ET4065C  
Laufzeit: 12/2018 – 11/2022

Gefördert durch:

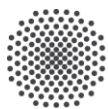


Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

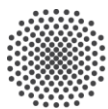
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Ort: Stuttgart  
Datum: 30.05.2023



## Inhalt

I.	Kurzdarstellung des Projekts .....	4
I.1	Aufgabenstellung .....	4
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	5
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
II.	Eingehende Darstellung .....	7
II.1	Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	7
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	11
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	11
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit .....	11
II.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	12
II.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen .....	12
III.	Kurzfassung des Abschlussberichts .....	13



## **I. Kurzdarstellung des Projekts**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Für das politische Ziel der Energiewende werden verschiedene, jeweils als „optimal“ bezeichnete Ausbaupfade beziehungsweise Energieszenarien diskutiert. Dies gilt sowohl für den Stromsektor als auch für den Wärmesektor. Alle haben gemeinsam, dass ihnen eine fundierte ressourcenstrategische Bewertung der Energiewende sowie eine Rückkopplung der Bewertungsergebnisse auf die Optimierung der Ausbaupfade des deutschen Energieversorgungssystems fehlen. Dieses Forschungsvorhaben dient dazu, diese Lücke zu schließen. Es hat zum Ziel, eine interdisziplinäre Bewertung des Ressourcenbedarfs für die Energiewende durchzuführen, um diese Ergebnisse bei der Optimierung von Energiesystemausbaupfaden berücksichtigen zu können. Unter Berücksichtigung der Technologien und Komponenten für die Bereitstellung, Übertragung, Speicherung von Strom sowie Wärme im Gebäudesektor und für die Energiebedarfsreduktion im Gebäudesektor will dieses Forschungsvorhaben als erstes die Charakteristika für ein optimales Energiesystem unter Berücksichtigung einer interdisziplinären Bewertung ableiten. Dabei werden die technologischen, ressourcenstrategischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Chancen und Risiken untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird der gesamte Lebenszyklus dieser Technologien betrachtet; neben den zur Herstellung der Technologien benötigten stofflichen Inputfaktoren wird die mögliche Wiederverwendung bzw. Entsorgung von Roh-/Abfallstoffen am Ende der Nutzungsphase interdisziplinär untersucht und bewertet.

Die Kernaufgabe der Universität Stuttgart ist die Quantifizierung des Ressourcenbedarfs über den gesamten Lebenszyklus mittels Life Cycle Assessment.

### **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt wurde als Verbundprojekt mit den folgenden Partnerinstitutionen durchgeführt:

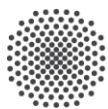
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
- Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management
- Universität Stuttgart, Institut für Akustik und Bauphysik, Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung

Das Projekt wurde fachlich von einem Expert\*innenbeirat begleitet. Dieser wurde vom Konsortium benannt bzw. angefragt.

Im Projektverlauf gab es vor allem für die Zusammenarbeit im Konsortium und mit dem Expert\*innenbeirat durch die Anforderungen und Einschränkungen durch die Corona-Pandemie einige zusätzliche, organisatorische Hürden.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Um die Zielstellung des Projektes zu erreichen, wurden zunächst die Pfade für den Ausbau des deutschen Energiesystems identifiziert (AP 1). Basierend darauf wurden Stellvertretertechnologien identifiziert und definiert, um den Ausbau inkl. der Ressourcenbedarfe zu modellieren (AP 2&3). Anschließend wurden die Ressourcenbedarfe für die unterschiedlichen Pfade berechnet (AP 4) und nach dem Versorgungsrisiko (inkl. ökologischer Aspekte) und ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen untersucht (AP 5-7). Für eine gesamtheitliche Bewertung wurde eine Methode zur multikriteriellen Bewertung erarbeitet (AP 9) auf deren Basis Rahmenbedingungen für optimale Entwicklungspfade abgeleitet wurden (AP 9). Der thematische Schwerpunkt der Universität Stuttgart lag in den APs 3 und 4 und der darin erstellen Ökobilanzen für die definierten Anforderungen zur Integration in die Systembetrachtung und multikriterielle Bewertung.



Neben den inhaltlichen Arbeiten wurden die Arbeiten zur Koordination des Projektes in AP 10 durchgeführt. Die untenstehende Abbildung verdeutlicht den Projektablauf. Das Projekt konnte inhaltlich wie geplant durchgeführt werden.

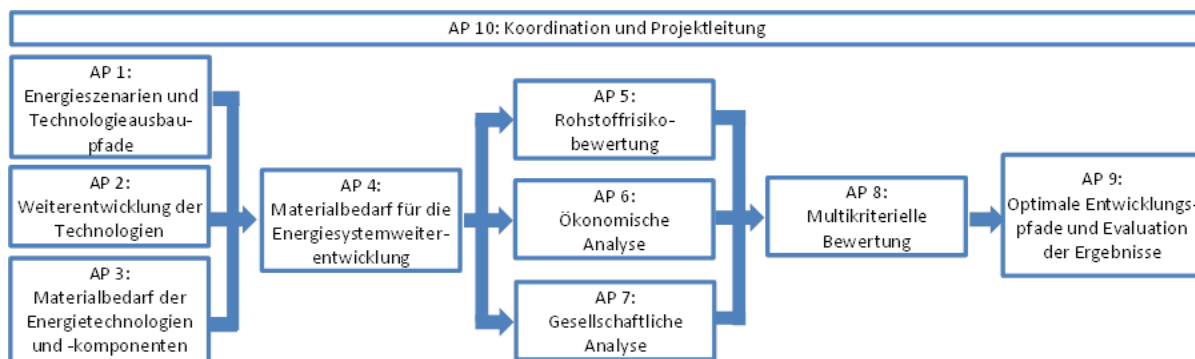


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des Projektvorhabens anhand der verschiedenen Arbeitspakete.

## I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der beschriebene Stand bezieht sich auf die Inhalte, die im Kern für die Arbeiten der Universität Stuttgart relevant sind.

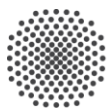
Sowohl für aktive (das heißt strom- und/ oder wärmeerzeugende Technologien wie z.B. ein Gasbrennwertkessel) als auch passive (das heißt den Verbrauch von Strom- und oder Wärme reduzierende Technologien wie z.B. Gebäudedämmsysteme) Technologien werden im Gebäudesektor bereits erfolgreich Ökobilanzen erstellt und zur Nachhaltigkeitsoptimierung angewendet. Beispielsweise stellt für die Ökobilanzierung von Bauwerken das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit mit der Plattform ÖKOBAUDAT<sup>1</sup> eine vereinheitlichte Datenbasis zur Verfügung. In der ÖKOBAUDAT werden Baumaterialien sowie Bau- und Transportprozesse hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen beschrieben. Sie bietet sowohl generische Datensätze als auch firmen- oder verbandsspezifische Datensätze aus Umweltproduktdeklarationen (EPD) an. Die EU-Bauproduktenverordnung Nr. 305/2011<sup>2</sup> ist seit 1. Juli 2013 verbindlich anzuwenden mit der Basisanforderung Nr. 7 "Nachhaltige Nutzung Natürlicher Ressourcen". Auch für die Abbildung der Ressourcenfrage werden EPD herangezogen. Für die Abbildung des Ressourcenverbrauches in der Ökobilanz wurden einige Indikatoren der Wirkungsabschätzung wie zum Beispiel das Abiotic Depletion Potential (ADP)<sup>3</sup> entwickelt. Bislang wird aber die Verfügbarkeit von Ressourcen noch nicht umfassend genug, über die geologischen Vorräte hinaus, berücksichtigt. Kritikalitätsuntersuchungen anderer Fachbereiche zur Versorgungslage können noch nicht vollumfänglich berücksichtigt und durch Informationen der Lebenszyklusperspektive erweitert werden<sup>4</sup>. Die Relevanz der Verfügbarkeit

<sup>1</sup> <http://www.oekobaudat.de/>

<sup>2</sup> <http://www.bmub.bund.de/themen/bauen/bauwesen/gesetzgebung-und-leitfaeden/bauproduktenrecht/eu-bauproduktenverordnung/>

<sup>3</sup> Schneider L. et al. (2015); Abiotic resource depletion in LCA – background and update of the anthropogenic stpck extended depletion potential (AADP) model. International Journal of Life Cycle Assessment (2015) 20:709-721

<sup>4</sup> Klinglmaier M. et al. (2013): Assessing resource depletion in LCA: A review of methods and methodological issues. International Journal of Life Cycle Assessment (2014) 19:580-592



kritischer Rohstoffe für die Energiewende zeigen allgemein Held und Reller<sup>5</sup>. Hinsichtlich der Bewertung von Rohstoffrisiken wurde gezeigt, dass bestehende Kritikalitätskonzepte vor allem auf die Rohstoffgewinnung und erste Stufen der Weiterverarbeitung fokussieren. Die Prozesskette bis zum Endprodukt und zur Entsorgung bzw. Wiederaufbereitung wird meist ausgespart.

Für die ökobilanziellen Energiesystemabbildung gibt es bereits einige Ansätze. Das Projekt Power&Biomass to Gas der Universität Stuttgart umfasst die Untersuchung eines ganzheitlichen Konzepts für eine, auf fluktuierenden erneuerbaren Energien ausgelegte Stromerzeugung<sup>6</sup>. Dabei wurde insbesondere die Integration des weiter steigenden Anteils erneuerbarer Energien über Speichermöglichkeiten im Erdgasnetz untersucht und ökobilanziell bewertet. Im Projekt „Analyse der Energie-Autarkiepotenziale für Baden-Württemberg mittels integrierter Energiesystemmodellierung“ verschiedener Stuttgarter Universitätsinstitute und des DLR, wurden bereits Simulationen und Szenarien zu den drei Kernbereichen der Energiewende, Wärme, Strom und Mobilität im privaten, industriellen und gewerblichen Sektor, erstellt<sup>7</sup>. Allerdings erfolgte bislang keine integrative, gekoppelte Betrachtung der beiden Bereiche Strom und Wärme und passive Technologien werden trotz ihrer großen Relevanz nur am Rande berücksichtigt. Die Vorgehensweise von Held<sup>8</sup> verknüpft bereits die Methoden der Ökobilanz und Szenarioanalyse. Potentielle Chancen und Risiken zukünftiger Entwicklungspfade konnten durch die Verknüpfung der Methoden Ökobilanz und Szenarioanalyse frühzeitig aufgedeckt und Aussagen über die Richtungssicherheit strategischer Entscheidungen aus Sicht der Umweltbilanz getroffen werden.

Die **Ökobilanz** ist eine Methode zur Quantifizierung der Umweltwirkungen von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen. Sie ist seit knapp 20 Jahren international in den Normen ISO 14040 und 14044 standardisiert und bietet einen einheitlichen Ansatz, um die notwendige Transparenz zur Bewertung verursachter Umweltwirkungen sicherzustellen. Ein Kernelement der Methode ist der Lebensweggedanke. So werden Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus, von der Rohstoffbereitstellung über die Herstellung und Nutzung bis zur Verwertung am Lebensende berücksichtigt und quantifiziert. In der Norm ISO 14040 sind die Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanz festgelegt, während die ISO 14044 Anforderungen und Anleitungen für die Anwendung der Methode bietet.

Spezifisch für den Baubereich besteht eine Reihe von Europäischen Normen, technischen Spezifikationen und Berichten zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden, die gemeinsam zur Quantifizierung des Beitrags des bewerteten Gebäudes zur Nachhaltigkeit im Bauwesen und zur nachhaltigen Entwicklung dienen. Hiervon sind zwei im Folgenden beispielhaft angeführt.

Zum einen auf Produktebene die europäische Norm EN 15804. Sie liefert Grundregeln für die Produktkategorie sämtlicher Bauprodukte und -leistungen. Sie stellt sicher, dass alle EPD für Bauprodukte, Bauleistungen und Bauprozesse in einheitlicher Weise abgeleitet, verifiziert und dargestellt werden. Eine EPD kommuniziert verifizierbare, genaue, nicht irreführende Umweltinformationen für Produkte und ihre Anwendungen.

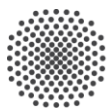
---

<sup>5</sup> Held M. u. Reller A. (2016); Die stofflichen Voraussetzungen der Energiewende in der Großen Transformation. Exner et al. (Hrsg.): *Kritische Metalle in der Großen Transformation*; 109-137

<sup>6</sup> Scober B. et al. (2017): Potenziale der Speicherung erneuerbarer Energie durch gasförmige Kohlenwasserstoffe auf Basis flexibler Biomassenutzung und Auswirkungen auf die Strombereitstellung und Netzentlastung in Baden-Württemberg. Abschlussbericht.

<sup>7</sup> Brodecki, L. et al (2017): Analyse der Energie-Autarkiepotenziale für Baden-Württemberg mittels Integrierter Energiesystemmodellierung. Abschlussbericht.

<sup>8</sup> Held, M. (2014): Methodischer Ansatz und Systemmodell zur ökologisch-technischen Analyse zukünftiger Elektrofahrzeugkonzepte. Fraunhofer Verlag.



Zum anderen die Europäische Norm EN 15978. Diese hat das Ziel, Berechnungsregeln für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität (Umweltleistung) von neuen und bereits bestehenden Gebäuden zur Verfügung zu stellen.

Auf Seite der Energiesysteme sind bislang einzelne, nicht bindende Richtlinien als Anleitung zur Ökobilanzierung spezifischer Technologien entstanden. Diese haben das Ziel durch konsistente Rahmenbedingungen harmonisierte Ökobilanzen und –Ergebnisse zu fördern.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es gab im Projekt keine Zusammenarbeit der Universität Stuttgart mit anderen Stellen (außerhalb des Projektkonsortiums).

Ein fachlicher Austausch fand vor allem durch die Sitzungen mit dem Expert\*innenbeirat und hierbei vor allem in der dezidierten Session zur LCA Modellierung statt.

Darüber hinaus gab es einen fachlichen Austausch auf den Jahrestreffen des Forschungsnetzwerks Energiesystemanalyse und im Dialog mit dem Konsortium des Projekts InNOSys – Integrated Sustainability Assessment and Optimization of Energy Systems (gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi).

## II. Eingehende Darstellung

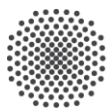
### II.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Folgenden werden die Ziele des Vorhabens anhand der Arbeitspakete dargelegt und die erzielten Ergebnisse basierend auf diesen Zielen beschrieben. Die Ziele und angestrebten Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspakete (Outputs) sind kursiv dargestellt. Bei den Outputs sind nur die Elemente gelistet, an denen die Universität Stuttgart beteiligt war.

#### AP 1: Analyse zukünftiger Energieszenarien und Technologieausbaupfade bis 2050

<i>Koordination</i>	<i>Fraunhofer ISE</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>ISE: 3 PM, USTUTT: 1PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 1 – Monat 3</i>
<i>Ziel</i>	<i>Zusammenstellung des Energietechnologiemixes aus Energieszenarien</i>
<i>Output</i>	<i>- Definition von Energieszenarien und Technologieausbaupfade - Priorisierung der zu untersuchenden Technologien basierend auf die installierte Kapazität und Inhalte von kritischen Rohstoffen</i>

In AP 1 wurden in Kooperation mit dem Fraunhofer ISE zwei Studien zu Energiesystemanalysen ausgewählt, die für die Szenarienbildung in InteRessE verwendet wurden. Es wurden jeweils alle Technologieausbaupfade der Studien betrachtet. Basierend auf den Studien wurden die Stellvertretertechnologien in Abhängigkeit der installierten Kapazitäten und den verwendeten kritischen Rohstoffen definiert. Die Stellvertretertechnologien sind in Gervais et al. (2022, S.7; siehe II.6) beschrieben, inkl. der in den Technologien verwendeten Ressourcen. Darüber hinaus wurden die Systemgrenzen der Szenarien herausgearbeitet, um daraus Ableitungen für die Ökobilanzmodelle zu



treffen. Zudem wurde die Modellierung der Schlüsselressourcen in den verwendeten Ökobilanzdatenbanken geprüft (eine Auflistung der Schlüsselressourcen und Stellvertretertechnologien findet sich in (Gervais et al. 2022, Tab. 01; siehe II.6).

## AP 2 Analyse der Weiterentwicklungspotenziale der Technologien

<i>Koordination</i>	<i>Fraunhofer ISE</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>ISE: 11PM, MRM: 3PM, USTUTT: 2PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 2 – Monat 9</i>
<i>Ziel</i>	<i>Quantifizierung des Materialintensivität für jede Technologie, Status Quo und Entwicklungspotenzial</i>
<i>Output</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Liste an aktiven und passiven Technologien inkl. wichtige, beschreibende Parameter (z.B. Jahresarbeitszahl, Effizienzsteigerung, U-Wert, etc.) pro Jahr</i></li> <li>- <i>Beitrag pro Jahr und Technologie (kWh/Jahr)</i></li> </ul>

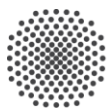
Als Kernelement des Arbeitspakets, und des gesamten Projekts, wurde gemeinsam mit dem Fraunhofer ISE das Format der Technologiesteckbriefe entwickelt, um alle Informationen über die Stellvertretertechnologien zu sammeln (inkl. Informationen über die Umweltwirkungen). Die Informationen über die Stellvertretertechnologien wurden in Gervais et al. (2022; jeweils Kapitel x.x.1-3; siehe II.6) veröffentlicht. Hierzu wurden die Anforderungen zur Dokumentation der Materialeffizienzmaßnahmen und der quantitativen Entwicklungsmaßnahmen festgelegt. Die getroffenen Annahmen wurden durch den Expert\*innenbeirat verifiziert. Technologiesteckbriefe enthalten neben einer technischen Beschreibung auch die Marktentwicklungen. Zudem werden aufbauen auf den Informationen die resultierenden Umweltwirkungen dargestellt.

## AP 3 Analyse des Materialbedarfs der Energietechnologien und -komponenten

<i>Koordination</i>	<i>Universität Stuttgart</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>USTUTT (AP-Leitung): 8PM: ISE: 3PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 4 – Monat 21</i>
<i>Ziel</i>	<i>Untersuchung der Materialzusammensetzung der Energietechnologien und -komponenten</i>
<i>Output</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Erste Analyse der Energietechnologien hinsichtlich Material- und Ressourcenbedarf</i></li> <li>- <i>Steckbriefe für Referenztechnologien und –Konstruktionen</i></li> <li>- <i>Aktive Technologien: Rohstoff- und Materialbedarf pro Energietechnologie und Jahr (embodied energy, GWP, ADP)</i></li> <li>- <i>Passive Technologien: Rohstoff- und Materialbedarf pro Energietechnologie und Jahr (embodied energy, GWP, ADP)</i></li> <li>- <i>Ökobilanzmodelle zur Weiterverwendung in AP4 auf Systemebene</i></li> </ul>

In diesem Arbeitspaket wurden vor allem die 24 Technologiemodelle basierend auf den Technologieinformationen aus den Steckbriefen entwickelt. Die methodischen Arbeiten zur Modellierung umfassten in erster Linie die Entwicklung von Modellierungsrichtlinien zur Vermeidung von Doppelzählungen (Double Counting) der Energiebedarfe aus der Nutzungsphase durch die Lebenszyklusbetrachtung in den Szenarien der Energiesystemmodellierung. Das Vorgehen ist in Betten et al. (2020; siehe II.6) veröffentlicht. Darüber hinaus wurde zur Validierung die Masterarbeit „Adaption of Life Cycle Assessment modeling for the application in energy system analysis by the example of





photovoltaic systems“ (Song 2020; siehe II.6) betreut. Ein Abgleich mit der ÖKOBAUDAT hat stattgefunden. Die Modelle für Sanierung folgen derselben Logik, bei den anderen Technologien war dies nicht sinnvoll. Das Feedback aus dem Expertenbeirat wurde in den Modellen umgesetzt. Dies beinhaltet vor allem die Dynamisierung des Strommix im Hintergrundsystem.

Die Form der Kommunikation der Ergebnisse in den Technologiesteckbriefen wurde in Abstimmung mit dem ISE definiert und den Projektpartnern im letzten Berichtszeitraum vorgestellt. Durch dieses Vorgehen und die frühe Implementierung konnten die Ergebnisse iterativ angepasst werden und Änderungen bei den Technologiebeschreibungen konnten auch spät im Projekt noch übernommen werden.

Zur Beschreibung der ökologischen Auswirkungen wurden die Auswirkungen auf den Klimawandel GWP und Ressourcennutzung ADP betrachtet (siehe Ausführungen zu AP 5).

Die Umweltwirkungen der versch. Technologien basierend auf den Ökobilanzmodellen sind in Gervais et al. (2022; jeweils Kapitel x.x.4; siehe II.6) veröffentlicht.

#### AP 4 Quantifizierung des Materialbedarfs für die Energiesystemweiterentwicklung

<i>Koordination</i>	<i>Fraunhofer ISE</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>ISE: 7 PM, MRM: 2, ISI: 6, USTUTT: 7PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 15 – Monat 25</i>
<i>Ziel</i>	<i>Quantifizierung des Materialbedarfs für die Energiesystemweiterentwicklung bis 2050</i>
<i>Output</i>	<ul style="list-style-type: none"><li><i>Rohstoff- und Materialbedarf auf Energiesystemebene (embodied energy, GWP, ADP) zeitlich aufgelöst</i></li></ul>

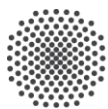
Für die Abbildung der zeitlichen Komponente bei der Entwicklung des Energiesystems, war die relevanteste Aufgabe in diesem AP die Dekarbonisierung des Energiesystems in die Ökobilanzmodelle zu integrieren. Das Vorgehen ist in Betten et al. (2020; siehe II.6) beschrieben.

Darüber hinaus war vor allem die Definition der gemeinsamen Datenformate für die Übergabe der Technologiedaten auf die Systemebene wichtig. Die frühe Festlegung hat auch dazu geführt, dass Änderungen iterativ und mit wenig Aufwand noch integriert werden konnten. Die Methode zur Kopplung der Technologie mit der Systemebene ist in Loibl et al. (2023; siehe II.6) beschrieben.

#### AP 5 Rohstoffrisikobewertung der deutschen Energiesystementwicklungspfade

<i>Koordination</i>	<i>MRM</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>MRM: 7 PM; USTUTT: 3PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 23 – Monat 29</i>
<i>Ziel</i>	<i>Untersuchung der angebots- und nachfrageseitigen Ressourcenverfügbarkeits- und Umweltrisiken</i>
<i>Output</i>	<ul style="list-style-type: none"><li><i>Analyse der ökologischen Auswirkungen (Bericht)</i></li></ul>

In diesem Arbeitspaket wurden von der Universität Stuttgart die vorhandenen Ansätze zur Wirkungsabschätzung identifiziert und auf ihre Eignung und Relevanz für die Bewertung von Ausbaupfaden geprüft. Dazu wurde die Bachelorarbeit „Bewertung des Ressourcenbedarfs von Windenergie in der Energiesystemanalyse mit LCA“ (Herbig 2020; siehe II.6), welche die versch. Möglichkeiten betrachtet, betreut. Die ausgewählten Indikatoren für die Bewertung der ökologischen Auswirkungen sind für den Klimawandel das Treibhauspotenzial und für den Ressourcenbedarf ADP. Eine Bewertung des Ressourcenbedarfs basierend auf den physikalischen Verbräuchen über den



gesamten Lebenszyklus mittels Ökobilanz wurde als nicht robust genug bewertet. Dies liegt u.a. an der Struktur der verwendeten Ökobilanzdatenbank. Die Masterarbeit „Data structures for the representation of resources and inventory data in life cycle assessment“ (Lancheros 2022; siehe II.6) vertieft und beschreibt die Erkenntnisse in diesem Bereich. Somit wurde für die Bewertung des Risikos die Menge der physisch in den Technologien verbauten Ressourcen verwendet.

#### AP 6 Ökonomische Analyse & AP 7: Gesellschaftliche Analyse

In AP 6 und AP 7 war kein Beitrag der Universität Stuttgart geplant.

#### AP 8: Multikriterielle Bewertung der interdisziplinären Analyse

<i>Koordination</i>	<i>MRM</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>MRM: 9PM, ISE: 2PM, USTUTT: 2PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 30 – Monat 38</i>
<i>Ziel</i>	<i>Multikriterielle Bewertung des Materialeinsatzes</i>
<i>Output</i>	- <i>Energieentwicklungspfade mit Beurteilung, Bündel von erstrebenswerten Pfaden als Input in AP 9</i>

Der Input der Universität Stuttgart zur multikriteriellen Bewertung ist durch die Auswahl und der Berechnung der Umweltwirkungen und Einordnung ebendieser geschehen.

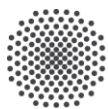
#### AP 9: Ableitung von Charakteristika optimaler Energiesystementwicklungspfade

<i>Koordination</i>	<i>Fraunhofer ISE</i>
<i>Arbeitsaufwand in PM</i>	<i>ISE: 4PM; MRM: 2PM; ISI: 2PM, USTUTT: 2PM</i>
<i>Laufzeit (geplant)</i>	<i>Monat 38 – Monat 42</i>
<i>Ziel</i>	<i>Zusammenfassung und Bewertung der optimierten Energieentwicklungspfade</i>
<i>Output</i>	- <i>Interdisziplinäre Risiken der bestehenden Energieszenarien</i> - <i>Charakteristiken von Energiesystementwicklungspfaden mit nachhaltigem Einsatz von Rohstoffen</i>

Die Ergebnisse der Universität Stuttgart bezüglich des Beitrags zum Klimawandel auf Technologiebasis konnten im System Dynamics Modell des ISE genutzt werden zur Ausweisung der direkten und indirekten Beiträge zum Klimawandel der verschiedenen Energieszenarien und so potentielle Konflikte mit den Klimazielen aufzeigen. Die Ergebnisse sind in Loibl 2022 und Loibl 2023 (siehe II.6) dargestellt. Eine ähnliche Darstellung auf Ressourcenebene war leider nicht möglich. Zum einen aufgrund der beschriebenen Herausforderungen in AP 5 zur Ausweisung der physikalischen Verbräuche und zum anderen da es Projekt nicht gelungen ist analog zu den Klimazielen physikalische Obergrenzen für den deutschen Ressourcenverbrauch aufzustellen.

#### AP 10 Koordination – Organisation, Kommunikation und Berichte

Die Universität Stuttgart hat an allen Projekttreffen, Treffen des Expert\*innenbeirats und dem Abschlusstreffen teilgenommen und sämtliche Berichtspflichten erfüllt.



## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Informationen zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises finden sich im Schlussverwendungsnachweis.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Methode der Ökobilanzierung ist eine standardisierte und anerkannte Methode, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen umfassend zu bestimmen und zu bewerten. Die Ergebnisse der Methode bieten eine hohe Synergiebasis für die Energiesystemanalyse da vorhandene Daten und Informationen weitergenutzt werden können, aber gleichzeitig neue Betrachtungsperspektiven ermöglicht werden. Im Projektteam lagen entsprechende Erfahrungen im Arbeitsgebiet der ökobilanziellen Abbildung von Energiesystem und Ressourcenkritikalität und deren Bewertungsmethoden vor, so dass zielgerichtet vorgegangen werden konnte. Durch die Definition von Stellvertretertechnologien gelang es die große Bandbreite der Energiesysteme abzubilden, dabei wurde Strom, Wärme und Sanierung berücksichtigt. Mittels der erstellten Technologiesteckbriefe konnte die Konsistenz der verwendeten Daten in allen Arbeitspaketen sichergestellt werden. Durch die Implementierung des Expertenbeirats und der speziellen Session zur Ökobilanzierung konnte eine hohe methodische Qualität der Arbeiten sichergestellt werden.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit**

Im Folgenden ist der Verwertungsplan für die Ergebnisse der Universität Stuttgart für die verschiedenen, relevanten Bereiche dargelegt.

### **Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen**

Durch die Universität Stuttgart wurden keine für diesen Bereich relevante Arbeiten durchgeführt.

### **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Durch die Universität Stuttgart ist keine direkte kommerzielle Nutzung der Projektergebnisse geplant.

### **Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten**

Die Ergebnisse bzgl. der Modellierung und Bewertung von Ressourcen sind in die Lehre der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung integriert worden, u.a. wurde ein Themenblock zu Ressourcenkritikalität in der Vorlesung „Nachhaltigkeit und Ganzheitliche Bilanzierung“ ergänzt.

Im Projekt wurden 2 studentische Arbeiten erstellt und betreut (siehe II.6) und insgesamt 5 Student\*innen als studentische Hilfskräfte an das Bearbeiten wissenschaftliche Projekte herangeführt.

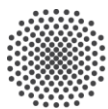
Die entstandenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind in Abschnitt II.6 gelistet.

Das gewonnene Wissen im Bereich der Ressourcenbewertung, aber auch zu den Datengrundlagen der Ökobilanz, soll in weiteren öffentlich geförderten Forschungsprojekten angewandt und ausgebaut werden.

### **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Ergebnisse zum Materialbedarf der Energietechnologien können von anderen Institutionen verwendet und weiterentwickelt werden. Dies wird vor allem durch die Veröffentlichung Gervais et al. (2022, siehe II.6) sichergestellt.

Eine Integration von Umweltwirkungen (z.B. Treibhauspotenzial oder Resource Depletion), die mittels Life Cycle Assessment berechnet werden, in die Energiesystemanalyse wird für möglich und erstrebenswert erachtet.



## II.5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Energieszenarien auf denen die Berechnungen im Projekt basierend stammen, aus den folgenden Studien:

- Fraunhofer ISI; Consentec GmbH; IFEU (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. BMWi.
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, K.; Schlegl, T. et al. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg.

Die Studie Sterchele et al (2020) erschien während dem Projekt und wurde nachträglich noch in die Bewertung aufgenommen.

Bzgl. der Bewertung vom Ressourcenbedarf in der Energiewende gab es während der Projektlaufzeit signifikante Erkenntnisse im Projekt InNoSys – Integrated Sustainability Assessment and Optimization of Energy Systems. Da es hier allerdings um die reine Quantifizierung der Umweltwirkungen geht, und nicht um die Kritikalitätsbewertung basierend auf den physikalischen Ressourcenbedarfen, ergaben sich keine Anpassungen für die Universität Stuttgart.

Darüber hinaus sind der Universität Stuttgart keine Fortschritte bekannt, welche die eigenen Arbeiten beeinflussen und während der Projektlaufzeit entstanden sind.

## II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen sind unter Mitwirken der Universität Stuttgart entstanden:

Journal Artikel (peer-reviewed)

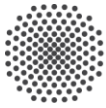
- Betten, T., Shammugam, S., Graf, R. (2020): Adjustment of the Life Cycle Inventory in Life Cycle Assessment for the Flexible Integration into Energy Systems Analysis. *Energies*, 13, 4437, <https://doi.org/10.3390/en13174437>.
- Gervais, E., Betten, T., Shammugam, S., Graf, R., Müller, M., Schlegl, T. (2022): Material requirements for the energy transition – Energy technology profiles and environmental impacts, <https://doi.org/10.24406/publica-427>.
- Loibl, A., Betten, T., Tercero L. (2023, geplant): Assessment of Resources for the German Energy Transition.

Konferenzbeiträge

- Graf, R., Betten, T. (2021): Quantification of the resource needs of the energy system transition with life cycle assessment, 2021 International Conference on Resource Sustainability, 21.07.2021, virtuell.
- Loibl, A., Betten, T., Tercero L. (2022): Modeling the Raw Material Requirements of the German Energy Transition. 14th ISIE SEM Conference, Wien, 19.09.2022.

Vorträge und Poster beim InteRessE Abschlussworkshop

- Betten T., Graf R., Meier J. (2022): Life Cycle Assessment zur Quantifizierung des Ressourcenbedarfs. Welche indirekten Emissionen verursacht die deutsche Energiewende? InteRessE Projektabschlussveranstaltung: Ressourcenfresser Energiewende, 18.10.2022 Berlin.
- Betten T., Graf R., Meier J. (2022): Life Cycle Assessment zur Quantifizierung des Ressourcenbedarfs. Wie lässt sich die Ressourcenintensität der deutschen Energiewende messen? InteRessE Projektabschlussveranstaltung: Ressourcenfresser Energiewende, 18.10.2022 Berlin.



- Loibl, A., Tercero, L., Shammugam, S., Gervais, E., Betten, T., Graf, R. (2022): Modellierung der Ressourcenbedarfe. InteRessE Projektabschlussveranstaltung: Ressourcenfresser Energiewende, 18.10.2022 Berlin.

#### Studentische Arbeiten

- Song, T. (2020): Adaption of Life Cycle Assessment modeling for the application in energy system analysis by the example of photovoltaic systems. Masterarbeit, Universität Stuttgart.
- Herbig, K. (2020): Bewertung des Ressourcenbedarfs von Windenergie in der Energiesystemanalyse mit LCA. Bachelorarbeit, TH Bingen.
- Lancheros, C. (2022): Data structures for the representation of resources and inventory data in life cycle assessment. Masterarbeit, Universität Stuttgart.

### III. Kurzfassung des Abschlussberichts

Auf der folgenden Seite findet sich die Kurzfassung des Abschlussberichts in Form des Berichtsblattes.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>	
3. Titel <b>Abschlussbericht zum Projekt InteResseE "Ressourcenbedarf für die Energiewende: Interdisziplinäre Bewertung von Szenarien für die Bereitstellung von Strom und Wärme"</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <b>Thomas Betten</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>30.11.2022</b>	6. Veröffentlichungsdatum <b>30.5.2023</b>
	7. Form der Publikation <b>Bericht</b>	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Universität Stuttgart Institut für Akustik und Bauphysik Abt. Ganzheitliche Bilanzierung Nobelstraße 12 70569 Stuttgart</b>	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn</b>		9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
		10. Förderkennzeichen <sup>1)</sup> <b>03ET4065C</b>
		11. Seitenzahl <b>14</b>
13. Literaturangaben <b>8</b>		14. Tabellen <b>7</b>
		15. Abbildungen <b>1</b>
		16. Zusätzliche Angaben -
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -		
18. Kurzfassung <p>Für das politische Ziel der Energiewende werden verschiedene, jeweils als „optimal“ bezeichnete Ausbaupfade beziehungsweise Energieszenarien diskutiert. Dies gilt sowohl für den Stromsektor als auch für den Wärmesektor. Alle haben gemeinsam, dass ihnen eine fundierte ressourcenstrategische Bewertung der Energiewende sowie eine Rückkopplung der Bewertungsergebnisse auf die Optimierung der Ausbaupfade des deutschen Energieversorgungssystems fehlen. Dieses Forschungsvorhaben hat zum Ziel, eine interdisziplinäre Bewertung des Ressourcenbedarfs für die Energiewende durchzuführen, um diese Ergebnisse bei der Optimierung von Energiesystemausbaupfaden berücksichtigen zu können. Unter Berücksichtigung der Technologien und Komponenten für die Bereitstellung, Übertragung, Speicherung von Strom sowie Wärme im Gebäudesektor und für die Energiebedarfsreduktion im Gebäudesektor will dieses Forschungsvorhaben als erstes die Charakteristika für ein optimales Energiesystem unter Berücksichtigung einer interdisziplinären Bewertung ableiten. Die Kernaufgabe der Universität Stuttgart ist die Quantifizierung des Ressourcenbedarfs über den gesamten Lebenszyklus mittels Life Cycle Assessment (LCA). Hierzu wurden die definierten Stellvertretertechnologien mittels LCA bewertet, eine Methode zur Integration von LCA in die Energiesystemanalyse entwickelt und die Herausforderungen bei der Betrachtung von physischen Ressourcen (Sachbilanz bzw. Materialebene in der LCA) beschrieben. Die Ergebnisse können dazu dienen, die Energiesystemanalyse um Bewertungsparameter zu erweitern.</p>		
19. Schlagwörter <b>Life Cycle Assessment, Energiesystemanalyse, Ressourcen, Energiewende</b>		
20. Verlag -	21. Preis -	

<sup>1)</sup> Hinweis für Bearbeiter/in: Auf das Förderkennzeichen des BMWK soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) <b>Final report</b>	
3. title <b>Abschlussbericht zum Projekt InteRessE          "Ressourcenbedarf für die Energiewende: Interdisziplinäre Bewertung          von Szenarien für die Bereitstellung von Strom und Wärme"</b>		
4. author(s) (family name, first name(s)) <b>Thomas Betten</b>	5. end of project <b>30.11.2022</b>	
	6. publication date <b>30.5.2023</b>	
	7. form of publication <b>Report</b>	
8. performing organization(s) (name, address) <b>University of Stuttgart          Institute for Acoustics and Building Physics          Dept. Life Cycle Engineering          Nobelstraße 12          70569 Stuttgart</b>	9. originator's report no. -	
	10. reference no. <b>03ET4065C</b>	
	11. no. of pages <b>14</b>	
12. sponsoring agency (name, address) <b>Bundesministerium für          Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)          53107 Bonn</b>	13. no. of references <b>8</b>	
	14. no. of tables <b>7</b>	
	15. no. of figures <b>1</b>	
16. supplementary notes -		
17. presented at (title, place, date) -		
18. abstract <p>For the political goal of the energy system transformation, various energy system expansion pathways or energy scenarios are being discussed, each of which is described as ideal. This applies to both the electricity sector and the heating sector. What they all have in common is that they lack a systematic resource-strategic evaluation of the energy transition as well as feedback of the evaluation results on the optimisation of the expansion paths of the German energy supply system. This research project aims to conduct an interdisciplinary assessment of the resource requirements for the energy transition to take these results into account when optimising energy system expansion paths. Considering the technologies and components for the generation, transmission, storage of electricity as well as heat in the building sector and for the reduction of energy demand in the building sector, this research project first aims to derive the characteristics for an ideal energy system, taking into account an interdisciplinary assessment. The core task of the University of Stuttgart is the quantification of the resource demand over the entire life cycle by means of Life Cycle Assessment (LCA).</p> <p>For this purpose, the defined proxy technologies were assessed using LCA, a method for integrating LCA into the energy system analysis was developed, and the challenges of considering physical resources (life cycle inventory vs. material level in LCA) were described. The results can be used to expand the energy system analysis to include assessment parameters.</p>		
19. keywords Life Cycle Assessment, energy system analysis, resources, energy transition		
20. publisher -	21. price -	