

Poster

Ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung von Heizungssystemen in Wohngebäuden: Ansatz, Datenbedarf und Einbindung einer dynamischen Strommixentwicklung

Marie Fischer, Sina Herceg, Karl-Anders Weiß
Fraunhofer Institut für Solare Energie Systeme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
www.ise.fraunhofer.de
Telefon: + 49 761 4588 5035
E-Mail: marie.fischer@ise.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Gerade durch das Inkrafttreten der Änderung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) Anfang dieses Jahres sollen die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von Heizungssystemen in Wohngebäuden vermehrt in den Fokus gesetzt werden. Neben ökonomischen Aspekten sollen so auch ökologische Faktoren mögliche Investitionsentscheidungen beeinflussen. Aktuell mangelt es dabei jedoch an einer ganzheitlichen Bewertungsmethode, die einen fairen Vergleich verschiedener Heizsysteme, sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht ermöglicht. Im Projekt „Effizientes Heizen“ soll diese Forschungslücke durch die Entwicklung eines ganzheitlichen Bewertungsansatzes geschlossen werden. Der vorliegende Beitrag fokussiert sich hierbei auf die ökologische Bewertung eines Heizsystems aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit solarthermischer Unterstützung. Der Schwerpunkt in diesem Beitrag liegt auf der Integration eines dynamischen Strommixes, um die kontinuierliche Dekarbonisierung des deutschen Strommixes, durch den Ausbau von erneuerbaren Energien, abzubilden. Vergleicht man die Annahme eines konstanten Strommixes über die Nutzungsdauer mit der Einbindung von Strommixprognosen zeigen sich deutliche Unterschiede. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss des Strommixes auf den CO₂-Fußabdruck (- 48%) der bereitgestellten Wärme. Der Ressourcenverbrauch steigt geringfügig (+ 3%).

EINLEITUNG

In Deutschland werden aktuell etwa 17,4% des Wärmebedarfs durch erneuerbare Energien (EE) gedeckt [1]. Die Biomasse leistet dabei den größten Beitrag zum regenerativen Wärmemarkt, ihr Anteil ist jedoch rückläufig. Die Nutzung von Erd- und Umweltwärme durch den Einsatz von Wärmepumpen (insbesondere Luft-Wasser-Wärmepumpen) hat in den letzten fünf Jahren stark zugenommen [2]. Aus Solarthermie-Kollektoren werden zurzeit etwa 5% des deutschen Wärmebedarfs gedeckt. [1]

Mit der beschlossenen Änderung des Gebäudeenergiegesetzes soll der Ausbau von erneuerbaren Energien im Wärmesektor weiter vorangetrieben werden. Für den Einbau neuer Heizungssysteme in Neubauten muss seit dem 01.01.24 mindestens 65% des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Für Bestandsgebäude sowie Neubauten in nicht-Neubaugebieten gelten hier entsprechende Ausnahmen und Übergangslösungen.

Erneuerbare Energien umfassen ein breites Spektrum an Technologien. Alle Technologien verursachen dabei Umweltauswirkungen während ihrer Produktion. Hier werden nicht nur Rohstoffe verbraucht, sondern auch Energieströme in Form von Strom und Wärme benötigt und Emissionen verursacht. Die Umweltauswirkungen aus den jeweiligen Nutzungsphasen können sich dagegen deutlich unterscheiden. Bei solarthermischen Kollektoren ist die Nutzungsphase weitgehend emissionsfrei. Die Auswirkungen, die der Nutzungsphase von Wärmepumpen zugeordnet werden, sind stark vom Strommix und der Systemeffizienz abhängig. Biomasse als drittes Beispiel verursacht direkte Emissionen durch den Verbrennungsprozess. Die Emissionen aus der Nutzung von Biomasse werden jedoch als biogene und nicht als fossile Emissionen betrachtet. Daher wird Biomasse derzeit als kohlenstoffneutrale Energiequelle deklariert.

Nicht nur die Umweltwirkungen, auch die Kosten und potenziellen Einnahmen können sich während der Lebensdauer dieser Systeme erheblich unterscheiden. Aufgrund dieser Vielfalt an Technologien ist ein umfassender Vergleich auf der Grundlage sowohl der ökologischen als auch der wirtschaftlichen Performance noch nicht möglich, und Investoren fehlt es an zuverlässigen Anhaltspunkten für nachhaltige Entscheidungen.

Umweltwirkungen werden über die Methodik der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) quantifiziert und bewertet. Der grundsätzliche Ansatz ist hierbei in den beiden ISO-Normen DIN EN ISO14040 und 14044 [3, 4] vordefiniert. Die Normen lassen jedoch viel Raum für individuelle Entscheidungen, was die Vergleichbarkeit von LCA-Ergebnissen einschränkt oder sogar verhindert. Variationen in den Systemgrenzen, den funktionellen Einheiten und den Auswertungsmethoden machen Vergleiche in vielen Fällen unmöglich. Während es für einzelne Technologien weitere Empfehlungen und Leitfäden zur Vereinheitlichung von ökologischen Bewertungen und somit zur Steigerung der Vergleichbarkeit gibt, beziehen sich diese vor allem auf einzelne Technologien und sind nicht technologieübergreifend anwendbar. Im nationalen Projekt „Effizientes Heizen“ soll diese Forschungslücke geschlossen werden. Es wird ein ganzheitlicher Bewertungsansatz entwickelt, um verschiedene Heiztechnologien sowohl anhand ökologischer als auch ökonomischer Performance zu bewerten und zu vergleichen. International wird diese Arbeit durch den SHC-Task 71 begleitet und unterstützt.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf den entwickelten methodischen Ansatz hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen (LCA), wobei diese exemplarisch auf ein kombiniertes Solarthermie- und Luftwärmepumpensystem angewendet werden.

METHODIK

Um Ökobilanzergebnisse technologieübergreifend vergleichbar zu machen, müssen entsprechende Randbedingungen definiert und standardisiert werden. Zuallererst ist hier die Vereinheitlichung der Systemgrenzen zu nennen. Dazu gehört die Entscheidung, welche Lebenszyklusphasen analysiert und bewertet werden (Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzungsphase, Recycling und/oder Entsorgung), ebenso wie die Definition des zu untersuchenden Produktsystems: Umfasst die Ökobilanz den gesamten Aufbau des Heizsystems (z.B. Wärmeerzeuger, Wärmespeicher und -verteilung) oder liegt der Fokus nur auf einer bestimmten Komponente oder Technologie (z.B. Wärmeerzeuger). Um einen umfassenden, fairen und anwendungsorientierten Vergleich zu ermöglichen, wird in diesem Projekt das Gesamtsystem über den kompletten Lebenszyklus betrachtet. Um die Vergleichbarkeit weiter zu erhöhen, basiert die Systemauslegung auf Standardlastprofilen. Die Heizungsanlagen sind auf den Bedarf von vier vordefinierten Referenzgebäuden (Ein- und Mehrfamilienhäuser, Neubau und Gebäudebestand) ausgelegt und entsprechend skaliert. Als funktionale Einheit wird 1 kWh bereitgestellte Wärme (1 kWh_{th}) verwendet. Dies bezieht sich auf die Wärme, die dem Verteilsystem im Gebäude zur Verfügung gestellt wird. Das Verteilsystem selbst liegt dabei außerhalb der Systemgrenzen und wird nicht mitbilanziert. Diese Vereinheitlichung der funktionalen Einheit und der Systemgrenzen ist essenziell, um die Ergebnisse der Ökobilanz vergleichbar zu machen. Der dritte Schlüsselfaktor bei der Standardisierung von Ökobilanzen ist die Wahl der Methode zur Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus. Gemäß den Empfehlungen der Europäischen Kommission wurde die EF3.0-Methode gewählt [5], wobei die relevanten Wirkungskategorien durch Hot-Spot-Analysen ermittelt werden. Es wird nach dem „cut-off“ Prinzip modelliert. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit Umweltgutschriften, potenzielle Belastungen und Vorteile, die über die Systemgrenzen hinausgehen, gesondert aufzuführen, so zum Beispiel die Recyclingfähigkeit von Produkten.

Während die Vereinheitlichung dieser eher methodisch ausgerichteten Aspekte einen ersten Vergleich der LCA-Ergebnisse ermöglicht, müssen weitere verschiedene technische Parameter definiert werden, um einen fairen und belastbaren Vergleich zu garantieren. Dazu gehören unter anderem die Lebensdauer der Systeme und ihrer Komponenten, der Wirkungsgrad, die Degradationsraten und -muster, der Installationsort, die End-of-Life-Behandlung der Komponenten und der verwendete Strommix. Wie bereits erwähnt, hängen die Auswirkungen, die der Nutzungsphase von Wärmepumpen zugeordnet werden, stark vom Strommix ab. Mit zunehmendem Einsatz von EE wird der Strom kontinuierlich de-karbonisiert. In einer Szenarioanalyse werden sowohl die Annahme des aktuellen Stromnetzmixes für die gesamte Nutzungsphase von bis zu 20 Jahren (Szenario 1), als auch ein dynamisches Strommixmodell (Szenario 2) in die Modellierung des Systems integriert. Das dynamische Strommixmodell ermöglicht die Berücksichtigung zukünftiger Strommixentwicklungen. Die Prognosen für die Entwicklung des deutschen Strommixes werden für 20 Jahre (2023 bis 2042) betrachtet. Die Datengrundlage

hierfür ist das Referenzszenario aus einer Studie des Fraunhofer ISE aus dem Jahr 2021 [6]. Die Strommixdaten für das Jahr 2023 (in Szenario 1) wurden aus den ISE Energy-Charts [7] übernommen. In beiden Szenarien werden jeweils die durchschnittlichen Strommixe ganzer Jahre betrachtet, sodass saisonale Schwankungen nicht untersucht werden. Nach vorläufigen Abschätzungen ist zu erwarten, dass die Veränderung des Strommixes über mehrere Jahre hinweg die unterjährlichen Schwankungen überlagert.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel dieser Ökobilanz ist die Quantifizierung der Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit der Wärmebereitstellung durch ein kombiniertes Solarthermie- und Luftwärmepumpensystem. Ein besonderer Schwerpunkt dieser Analyse liegt auf der Bewertung des Einflusses eines dynamischen Strommixes auf die gesamten Lebenszyklusauswirkungen. Die Systemgrenzen umfassen die Produktions- und die Nutzungsphase, während das Lebensende aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit ausgelassen wird. Diese Datenlücke wird jedoch im Rahmen des Projekts geschlossen und das Lebensende wird zu einem späteren Zeitpunkt miteinbezogen und bilanziert. Das untersuchte System ist nach einer vordefinierten Heizkurve eines neu gebauten Einfamilienhauses in Deutschland mit einem jährlichen Wärmebedarf von 9228 kWh für Heizung und Warmwasserbedarf skaliert. Das System umfasst eine thermische Solaranlage mit vier Flachkollektoren sowie eine Luftwärmepumpe, die in denselben Warmwasserspeicher einspeisen. Sowohl die Heizung als auch das Warmwasser werden aus diesem Speicher bereitgestellt. Für die Warmwasserversorgung ist eine Frischwasserstation in das System integriert. Aufgrund mangelnder Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) -Daten wird diese Komponente nicht bilanziert. Der Warmwasserbedarf in den Sommermonaten wird vollständig durch die thermischen Solarkollektoren gedeckt, was zu einem jährlichen solaren Deckungsanteil von etwa 28,5% führt. **Abbildung 1** zeigt ein vereinfachtes Schema des untersuchten Systems. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWWP), die Solarkollektoren und der Speicher sowie die Rohrleitungen und Ausdehnungsgefäße sind in dieser Ökobilanz enthalten, während das Verteilsystem außerhalb der Systemgrenzen liegt. Weitere Informationen zu den einzelnen Komponenten werden im nächsten Kapitel (Sachbilanzdaten) erläutert. Die Lebensdauer des Systems wird mit 20 Jahren angenommen, während als Sensitivitätsanalyse eine Lebensdauer von 25 Jahren getestet wird. Zur Reduktion von Komplexität wird davon ausgegangen, dass die Leistung des Heizungssystems über die untersuchte Lebensdauer von 20 Jahren konstant ist, so dass keine Degradation berücksichtigt wird. Dies gilt insbesondere für den Stromverbrauch und die Wärmeerzeugung des Heizungssystems, die als konstant angenommen werden.

Die gewählte funktionale Einheit ist 1 kWh Wärme, die dem Gebäude zur Deckung des Warmwasser- und Heizbedarfs zur Verfügung gestellt wird. Die Analyse wurde unter Verwendung der EF3.0-Methode durchgeführt, die von der Europäischen Kommission empfohlen und bereitgestellt wird [5]. In diesem Beitrag werden die Wirkungskategorien *Klimawandel*, *Ökotoxizität*, *Süßwasser* und

Ressourcenverbrauch, Mineralien und Metalle im Detail untersucht. (Im Projekt werden weitere Auswirkungen untersucht.) Als Produktionsstandort für alle Komponenten wird Europa angenommen. Die Transportentfernungen zum Installationsort werden in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

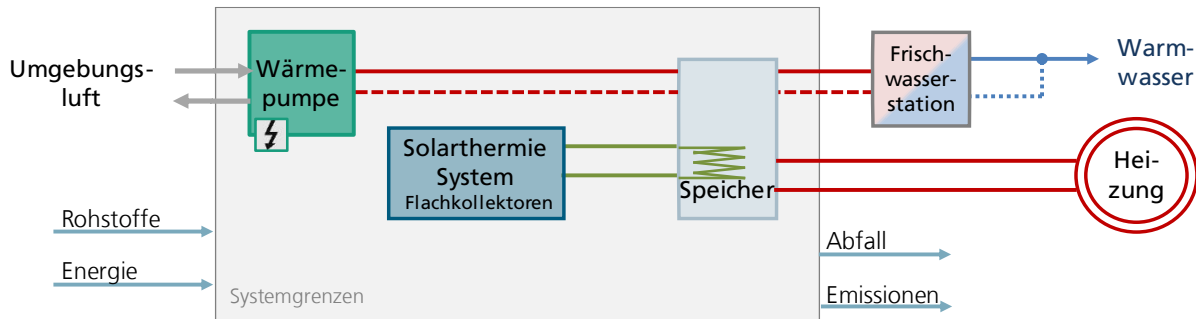


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Systemgrenzen des untersuchten Heizsystems aus Luft-Wasser-Wärmepumpe und solarthermischen Kollektoren.

Sachbilanzdaten

Das Heizungssystem wird in der LCA-Software SimaPro (v9.5.0.2) mit ecoinvent (v3.8) als Hintergrunddatenbank modelliert. Die Vordergrunddaten stammen aus Projekt- und Literaturdaten. Die Skalierung des Systems und seiner Komponenten (Typ/Größe/Nennleistung von Wärmepumpe/Kollektoren/Tank) sowie die Leistungsparameter (Strombedarf in der Nutzungsphase, solarer Deckungsanteil) werden aus Projektdaten übernommen und entsprechen dem Energiebedarf des definierten Referenzgebäudes.

Die LWWP hat eine Nennleistung von 2,5 kW bei A2/W35. Sie wiegt 150 kg, und es werden 2,18 kg Kältemittel (R410a) verwendet. In Übereinstimmung mit [8] wird ein Kältemittelverlust von 2% bei der Installation angenommen. Das LCI der Wärmepumpe wurde aus einem Durchschnitt aus [9–12] abgeleitet. Zusätzlich zur LWWP umfasst das System vier solarthermische Kollektoren mit einer Fläche von jeweils etwa 2,5 m². Die LCI-Daten für den Solarkollektor beruhen auf Projektdaten, die auf Basis von ecoinvent-Information ergänzt und vervollständigt wurden [13]. Der Wärmeträger im solarthermischen System ist ein Gemisch aus Wasser und Propylenglykol. Aufgrund von Literatur- und Herstellerangaben wird davon ausgegangen, dass die Solarflüssigkeit nach zehn Jahren ausgetauscht werden muss. Das Solarsystem umfasst neben den Kollektoren ein 25-l-Ausdehnungsgefäß sowie isolierte Kupferrohre. Ein Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 750 l und ein 100-l-Ausdehnungsgefäß vervollständigen das Heizsystem. Die Sachbilanzdaten für den Warmwasserspeicher wurden aus [14] übernommen und auf die benötigte Größe herunter skaliert. Die Daten für das Ausdehnungsgefäß stammen aus ecoinvent [13].

Der Strommix für das Jahr 2023 wurde aus [7] übernommen, während die Prognosen zur Entwicklung des deutschen Strommixes über die nächsten 20 Jahre aus dem Referenzszenario in [6] stammen.

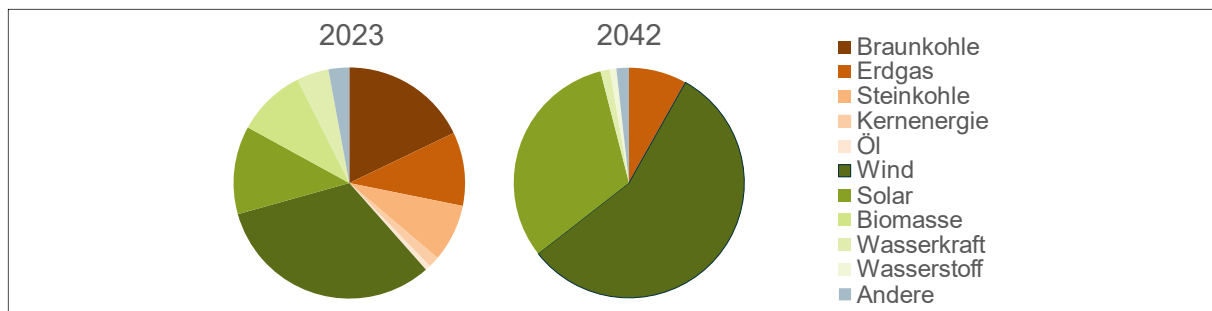


Abbildung 2: Strommix nach Jahr und Energieträger, relative Darstellung. Rötliche Farbtöne zeigen fossile Energieträger, während Grüntöne erneuerbare Energien visualisieren. Eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von [6] und [7].

In **Abbildung 2** sind die beiden Strommixe für 2023 und 2042 dargestellt. Der Strommix für 2023 beruht dabei auf gemessenen Werten [7]. Die Strommixprognose für 2042 beruht auf einer ökonomischen Optimierung aus [6]. 2023 wurde noch fast 40% des Stroms aus fossilen Energieträgern gewonnen. Durch den Ausstieg aus Atomenergie und Kohleverstromung, sowie der Ausbau von erneuerbaren Energien, soll der Strommix klimafreundlicher werden. Für 2042 wird somit ein Anteil fossiler Energieträger von <10% prognostiziert. Laut Prognose wird der zukünftige deutsche Strommix klar von Wind- und Solarstrom dominiert, mit Anteilen von ungefähr 56% und 32%. Es ist klar festzuhalten, dass der angenommene Strommix für 2042 großen Unsicherheiten unterliegt. Da es in diesem Beitrag jedoch vorrangig um den Einfluss des Strommixes und der Strommixentwicklung auf die Umweltbilanz der bereitgestellten Wärme aus einem LWWP-System mit solarthermischer Unterstützung geht, ist diese Prognose dennoch geeignet, um Einflüsse und Sensitivitäten zu untersuchen. Der Fokus des Beitrags liegt somit weniger auf absoluten Ergebnissen, sondern primär auf der Analyse relativer Änderungen.

Für die Nutzungsphase wird der Stromverbrauch durch Systemsimulationen mit PolySun berechnet. Für dieses Heizsystem wird ein jährlicher Strombedarf von 2825 kWh_{el} berechnet, bei einer Wärmeenergieproduktion von 9261 kWh_{th}.

BEWERTUNG DER UMWELTWIRKUNGEN

Für die Wirkungsabschätzung wird die EF3.0-Methodik angewandt. Wie bereits erwähnt, liegt der Schwerpunkt in diesem Beitrag auf den Wirkungskategorien *Klimawandel*, *Ökotoxizität*, *Süßwasser* und *Ressourcenverbrauch*, *Mineralien und Metalle*. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung im Detail dargestellt.

Produktionsphase

Zunächst wird die Produktion des Systems analysiert. Ein Überblick über die Beiträge der Systemkomponenten zu den gesamten Produktionsauswirkungen in den drei untersuchten Kategorien ist in **Abbildung 3** dargestellt. Die LWWP trägt dabei 65% des CO₂-Fußabdrucks bei. Die Produktion der Solarthermieanlage verursacht 23% der

Wirkungen in der Kategorie Klimawandel, während der Anteil des Warmwasserspeichers bei 11% liegt. Das Ausdehnungsgefäß trägt etwa 1% zu den Umweltwirkungen in dieser Kategorie bei. In der Kategorie *Ökotoxizität* sind die Anteile in etwa vergleichbar. Allerdings trägt die thermische Solaranlage rund ein Drittel zu den Produktionsauswirkungen bei, während die Produktion des Warmwasserspeichers nur für weniger als 3% der Umweltwirkungen verantwortlich ist. Die Auswirkungen, die auf das Ausdehnungsgefäß zurückzuführen sind, machen 0,3% aus. Betrachtet man die Wirkungskategorie *Ressourcenverbrauch, Mineralien und Metalle*, so sind die durch den Warmwasserspeicher und das Ausdehnungsgefäß verursachten Auswirkungen vernachlässigbar gering. Etwa 71% der Auswirkungen in dieser Kategorie sind auf die LWWP-Produktion zurückzuführen, während 28% auf die Produktionsphase des Solarsystems zurückzuführen sind.

Betrachtet man die einzelnen Komponenten nun genauer, zeigt sich, dass innerhalb der LWWP die Verwendung von Kupfer, sowie die elektronische Steuereinheit Hauptverursacher der Umweltwirkungen sind. Was die *Ökotoxizität* und den *Ressourcenverbrauch* betreffen, so sind sie für etwa 95% der Produktionsauswirkungen verantwortlich. In der Kategorie *Klimawandel* machen zusätzlich der Strom- und Wärmeverbrauch im Produktionsprozess zusammen fast 16% des Kohlenstoff-Fußabdrucks aus. Andere Materialien wie Stahl, Isolierung und Aluminium sind für die restlichen 14% der Umweltwirkungen in der Kategorie *Klimawandel* verantwortlich. Das Kältemittel (R410a) trägt in allen drei Kategorien weniger als 1% bei.

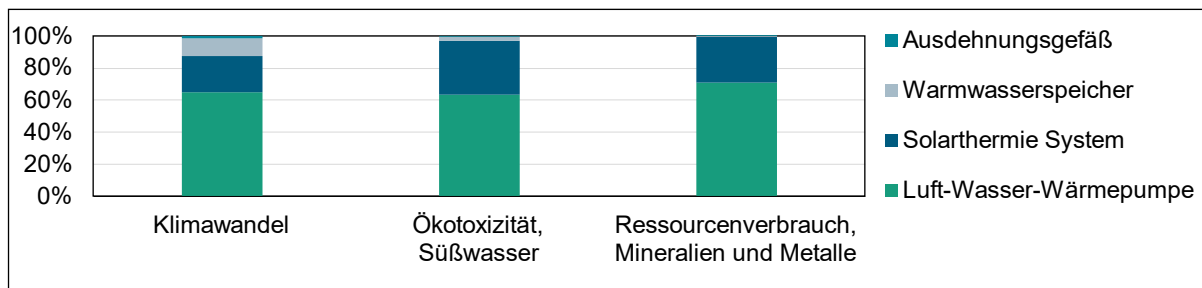


Abbildung 3: Beiträge der Hauptkomponenten zu den Umweltwirkungen der Produktionsphase nach Wirkungskategorie. Die funktionelle Einheit ist hier das Heizsystem selbst. Auswertungsmethode: EF3.0, Charakterisierung.

Neben den Kollektoren umfasst die thermische Solaranlage auch isolierte Kupferrohre, die Solarflüssigkeit als Wärmeträgermedium und ein 25-l-Ausdehnungsgefäß. Während die Kollektoren den Großteil der Umweltauswirkungen in allen drei Kategorien des Solarsystems verursachen, haben insbesondere in den Kategorien *Ökotoxizität* und *Ressourcenverbrauch* auch die Kupferrohre mit 38% bzw. 44% einen erheblichen Einfluss. Die Rohrleitungen und die Solarflüssigkeit tragen mit 10% bzw. 8% zum CO₂-Fußabdruck des Solarsystems bei, während der Beitrag der Solarkollektoren bei 78% liegt. Die klimarelevanten Emissionen werden hauptsächlich der Verwendung von Aluminium, Kunststoffen, Kupfer und Solarglas zugeschrieben.

Der Warmwasserspeicher ist aus Stahl gefertigt, der in allen drei untersuchten Kategorien mehr als 85% der Umweltwirkungen der Tankproduktion verursacht. Er ist mit Glaswolle isoliert, deren Einfluss je nach Wirkungskategorie zwischen 4% und 7% beträgt. Wärme- und Stromverbrauch in der Produktion tragen mit etwa 7% zu den Auswirkungen in der Kategorie *Klimawandel* bei.

Nutzungsphase

Um eine ganzheitliche Bewertung vornehmen zu können, muss auch die Nutzungsphase berücksichtigt werden. Diese beinhaltet sowohl den Strombedarf als auch den Austausch der Solarflüssigkeit nach zehn Jahren. Andere Wartungs- oder Reparaturprozesse sind in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Da es in der Ökobilanzliteratur für Wärmepumpen keinen Konsens über eine mögliche Kältemittelleckage gibt, wird diese zunächst nicht berücksichtigt, sondern in einer Sensitivitätsanalyse separat bewertet. Zwei Szenarien werden hinsichtlich des verwendeten Strommixes untersucht. In Szenario 1 werden die Umweltwirkungen, die mit der Verwendung eines konstanten Strommixes über die gesamte 20-jährige Lebensdauer des Systems verbunden sind, quantifiziert und bewertet. In Szenario 2 wird die prognostizierte Entwicklung des deutschen Strommixes unter Berücksichtigung jährlicher Änderungen betrachtet und eingebunden.

Szenario 1: Konstanter Stromnetzmix

Für den konstanten Strommix wird der für 2023 angegebene durchschnittliche deutsche Strommix aus den ISE Energy Charts übernommen [7]. 41% des Stroms stammten aus erneuerbaren Quellen, während 59% des Netzmixes aus fossilen Brennstoffen stammten. Der größte Anteil des Stroms wird von Onshore-Windturbinen mit mehr als 26% im Jahr 2023 geliefert. Der berechnete Kohlenstoff-Fußabdruck des Strommixes in diesem Jahr beträgt 0,43 kg CO₂ eq/kWh_{el}.

Nimmt man dies als konstanten Strommix über die gesamte Lebensdauer des

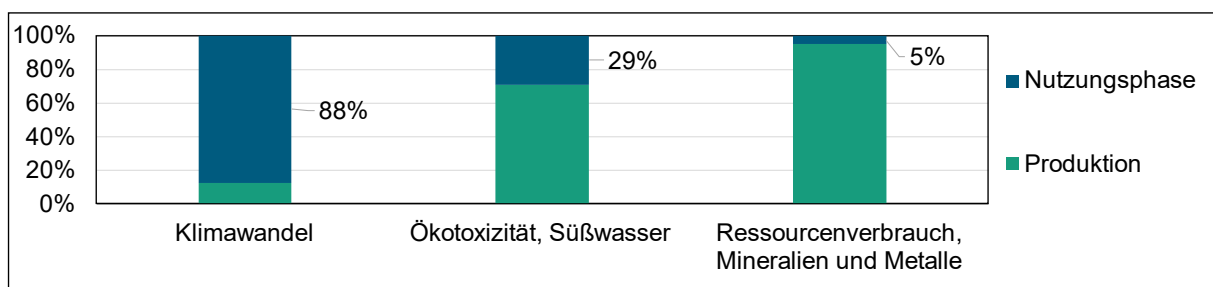


Abbildung 4: Beiträge der Lebenszyklusphasen des definierten Heizsystems unter Annahme eines konstanten Strommixes über die gesamte Nutzungsdauer (Szenario 1) nach Wirkungskategorie. Dargestellt ist die Wirkungsabschätzung der Produktions- und Nutzungsphase. Die funktionelle Einheit ist 1 kWh_{th}, die vom Heizsystem bereitgestellt wird. Auswertungsmethode: EF3.0, Charakterisierung.

Systems von 20 Jahren an, beträgt der CO₂-Fußabdruck der vom Heizsystem bereitgestellten Wärme 0,15 kg CO₂ eq/kWh_{th}. Wie in **Abbildung 4** zu sehen, dominiert

der Stromverbrauch mit einem Beitrag von fast 90% die Auswirkungen in der Kategorie *Klimawandel*. Der Beitrag der Nutzungsphase in den anderen beiden untersuchten Kategorien ist mit 29% bzw. 5% für *Ökotoxizität* und *Ressourcenverbrauch* deutlich geringer. Das Nachfüllen der Solarflüssigkeit (Propylenglykol) hat in keiner der untersuchten Kategorien sichtbare Auswirkungen.

Szenario 2: Einfluss des dynamischen Strommixes

Da durch den Ausbau der EE die Dekarbonisierung des Strommixes zunehmend voranschreitet, ist zu erwarten, dass die Annahme eines konstanten Strommixes für einen Zeitraum von 20 Jahren zu einer Überschätzung des CO₂-Fußabdrucks führt. Somit wurde im zweiten Szenario ein dynamisches Strommixmodell verwendet, das die prognostizierten Entwicklungen über die nächsten zwei Jahrzehnte widerspiegelt.

Die Vorhersagen wurden aus dem Referenzszenario in [6] übernommen und in SimaPro implementiert. Während die AutorInnen in ihrer Studie den Zeithorizont bis 2045 darstellen, werden für diese Bewertung nur 20 Jahre betrachtet (2023 bis 2042). Der für das Jahr 2042 prognostizierte Strommix besteht zu fast 90% aus Solar- und Windstrom, während noch etwa 6% des Stroms von Gaskraftwerken bereitgestellt wird. Der CO₂-Fußabdruck sinkt somit bis dahin auf 0,10 kg CO₂ eq/kWh_{el}.

Um diese prognostizierten Emissionsminderungen zu berücksichtigen, wurde eine dynamische Modellierung des Strommixes durchgeführt. Szenario 2 berücksichtigt folglich nicht nur den Strommix in den Jahren 2023 und 2042, sondern auch die Entwicklung der jährlichen Durchschnittswerte (siehe **Abbildung 5a**). Dieses dynamische Strommixmodell führt zu einem durchschnittlichen CO₂-Fußabdruck von 0,20 kg CO₂ eq/kWh_{el}. Dies entspricht einer Verringerung der Klimawirkungen pro kWh_{el} um 54% im Vergleich zum Referenz-Strommix aus 2023 (siehe **Abbildung 5b**).

Die Entwicklung in der Kategorie *Ökotoxizität* ist vergleichbar. Hier wird durch die Einbindung der Strommixentwicklung eine Reduktion der Umweltwirkungen um 42% im Vergleich zur Referenz erreicht. Der Trend in der Kategorie *Ressourcenverbrauch* ist dagegen umgekehrt. Hier steigen die Umweltwirkungen mit zunehmendem EE-Anteil im Strommix signifikant an. Bezogen auf den Referenz-Strommix aus Szenario 1 liegen die Emissionen des Strommixes aus Szenario 2 in dieser Kategorie je kWh_{el} um 64% höher. Das liegt daran, dass die EE-Technologien aufgrund ihrer Komplexität einen höheren Ressourcenverbrauch in ihrer Produktionsphase verursachen, während sie in der Nutzungsphase wenig bis gar keine Brennstoffe benötigen. (Der Verbrauch fossiler Brennstoffe wird in einer anderen Kategorie erfasst, da sich diese Kategorie der Ressourcenverbrauch speziell auf Mineralien und Metalle bezieht.)

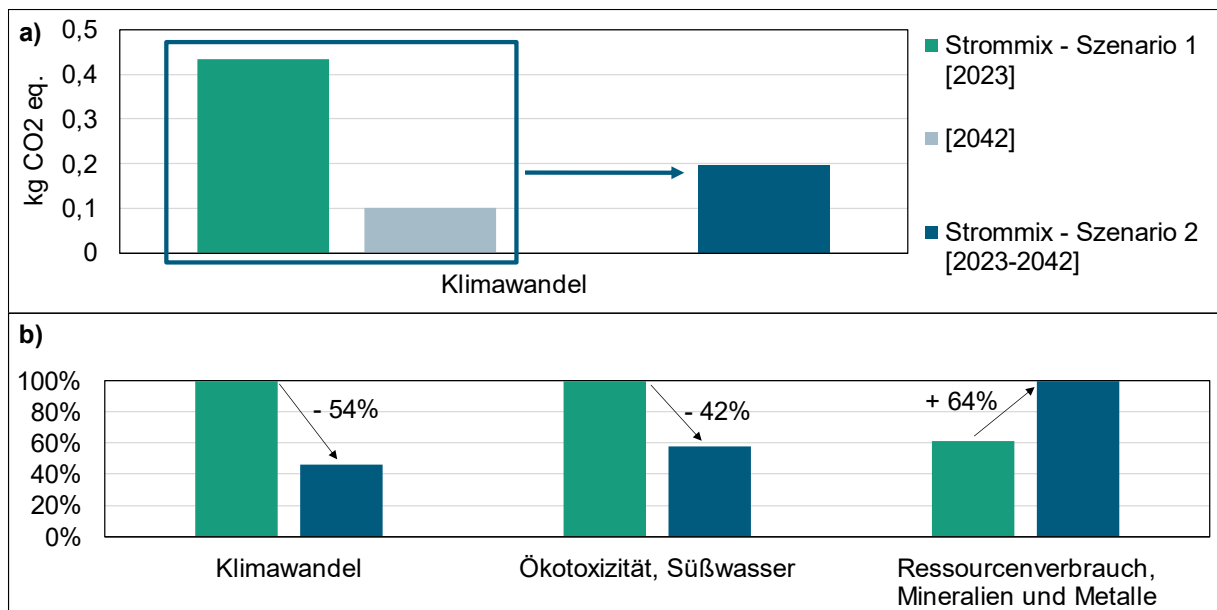


Abbildung 5: Vergleich der Wirkungsabschätzung der verschiedenen Strommische in Szenario 1 und 2. a) CO₂-Fußabdruck der untersuchten Strommische: Strommix aus 2023, prognostizierter Strommix für 2042 und das daraus berechnete gewichtete Mittel aus diesem 20-Jahres-Zeitraum. b) Vergleich der Strommische für beide Szenarien in allen drei betrachteten Kategorien. Der größere Wert je Kategorie ist als 100% definiert, während der andere relativ dazu dargestellt ist. Die funktionale Einheit ist in beiden Teilgrafiken 1 kWh_{el}, Auswertungsmethode: EF3.0, Charakterisierung.

Durch die Integration des dynamischen Strommixmodells wird dessen Einfluss auf die Umweltwirkungen der durch das modellierte LWWP- und Solarthermie-Heizsystem bereitgestellten Wärme quantifiziert. Dabei erfolgt die Auswertung auch hier in Bezug auf die gewählte funktionale Einheit von 1 kWh_{th}. Eine Übersicht der Veränderungen ist in **Abbildung 6** dargestellt. Der berechnete CO₂-Fußabdruck der von der LWWP und der Solaranlage bereitgestellten Wärme ist in Szenario 2 deutlich niedriger als in Szenario 1. Wie bereits erwähnt, liegt der auf der Grundlage des statischen Strommixes (Szenario 1) berechnete CO₂-Fußabdruck bei 0,15 kg CO₂ eq/kWh_{th}.

Berücksichtigt man die Entwicklung und damit die Dekarbonisierung des Strommixes (Szenario 2), sinkt der CO₂-Fußabdruck, der dem Heizsystem zugeschrieben wird, auf 0,08 kg CO₂ eq/kWh_{th}. Dies ist eine Verringerung um 48%. Auch die Ökotoxizitätswirkungen werden reduziert, wenn auch nicht so stark wie die Treibhausgasemissionen. Hier führt die Berücksichtigung der zukünftigen Strommixentwicklung zu einer Reduktion der Umweltwirkungen um 12% pro kWh_{th}. Der Ressourcenverbrauch dagegen steigt im Vergleich um 3% gegenüber dem Basisjahr 2023. Da die Auswirkungen der Nutzungsphase in der Kategorie *Ressourcenverbrauch* gering sind, hat die Veränderung des Strommixes in dieser Kategorie nur wenig Einfluss.

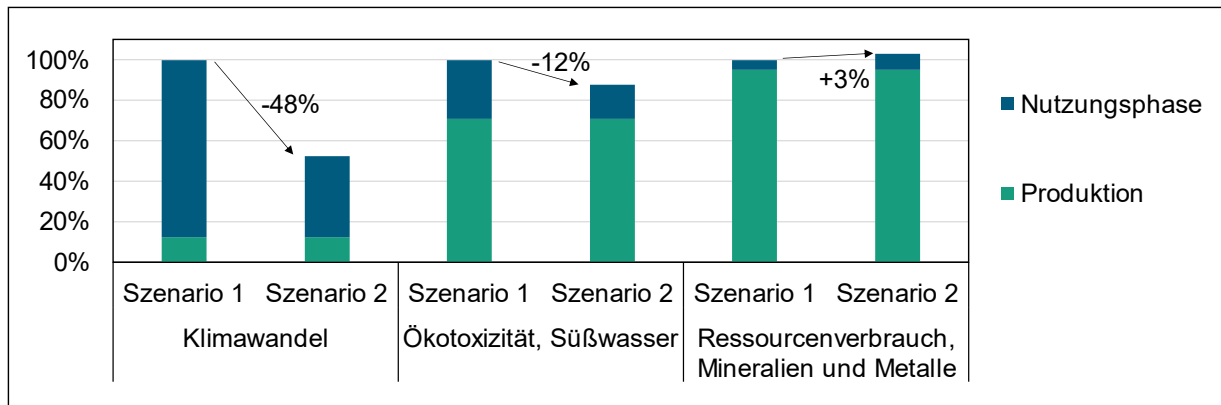


Abbildung 6: Vergleich der Beiträge der Lebenszyklusphasen des definierten Heizsystems nach Szenario und Wirkungskategorie. Dargestellt ist die Wirkungsabschätzung der Produktions- und Nutzungsphase. Die Umweltwirkungen aus Szenario 1 sind jeweils als 100% definiert, während die Umweltwirkungen aus Szenario 2 relativ dazu dargestellt sind. Die funktionelle Einheit ist 1 kWh_{th}, die vom Heizsystem bereitgestellt wird. Auswertungsmethode: EF3.0, Charakterisierung.

Sensitivitätsanalysen

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen beruhen auf den Grundannahmen aus Szenario 2, das daher auch die Basis für Vergleiche darstellt.

Kältemittelleckage

Wie bereits erwähnt, wird die Leckage des Kältemittels aus der Wärmepumpe durch eine Sensitivitätsanalyse bewertet. In der Literatur werden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Leckageraten berücksichtigt. [8, 11] gehen von jährlichen Leckageraten von 2% bis 3,5% aus, während [9, 15] diesen Wert auf 6% festlegen. In diesem Artikel wurde dieser höhere Wert von 6% für die jährliche Leckagerate gewählt, um die Sensitivität zu testen. Obwohl dieser Wert als konservativ hoch angesehen werden kann, zeigen die Ergebnisse vernachlässigbar geringe Änderungen in allen drei Kategorien (< 0,1%) je funktioneller Einheit.

Verlängerte Lebensdauer

In den meisten LCA-Studien wird die Lebensdauer eines Wärmepumpensystems mit 20 Jahren angenommen. Laut [12] kann jedoch auch eine 25-jährige Lebensdauer realistisch sein. Um den Einfluss der Lebensdauer zu quantifizieren, wurde somit auch diese Änderung als Sensitivitätsanalyse mit einem dynamischen Strommix für die nächsten 25 Jahre getestet. Die Ergebnisse zeigen eine 17% bis 18%ige Reduktion der Umweltwirkungen pro kWh_{th} für alle drei Kategorien im Vergleich zu Szenario 2. Das liegt daran, dass die einmalig auftretenden Produktionsemissionen auf eine höhere Wärmebereitstellung aufgeteilt werden. Somit sinkt der Anteil an den Lebenszyklusemissionen, die in der Produktion verursacht werden, im Vergleich zur kürzeren Lebensdauer.

DISKUSSION

Die Ergebnisse zeigen einen erheblichen Einfluss des Strommixes auf den ökologischen Fußabdruck des vorgestellten Heizsystems. Die Umweltwirkungen in der Kategorie *Klimawandel* hängen weitgehend vom Strommix ab, der für die Nutzungsphase angenommen wird. Die kontinuierliche Dekarbonisierung des Strommixes zeigt daher signifikante Auswirkungen auf den CO₂-Fußabdruck des Systems. Dies ist auf die Verringerung des Anteils an fossilem Strom von 41% im Jahr 2023 auf durchschnittlich 20% im dynamischen Strommixmodell zurückzuführen. Folglich wurde der Anteil der erneuerbaren Energien von Szenario 1 auf Szenario 2 von 59% auf 80% erhöht. Die Verringerung der Umweltwirkungen des Strommixes um 42% von Szenario 1 auf Szenario 2 führt zu einem Rückgang der Ökotoxizitäts-Wirkung des Heizsystems um 12% pro kWh_{th}. Diese Reduktion ist größtenteils auf den Rückgang des Kohlestromanteils zurückzuführen. Nur in der Kategorie *Ressourcenverbrauch, Mineralien und Metalle* werden die dem Strommix zugeordneten Wirkungen durch den Einsatz erneuerbarer Stromquellen erhöht. Die Auswirkungen pro kWh_{el} erhöhen sich von Szenario 1 zu Szenario 2 um 64%. Da der Einfluss der Nutzungsphase in dieser Kategorie jedoch vergleichsweise gering ist, liegen die Gesamtveränderungen der Umweltwirkungen pro kWh_{th} bei nur 3%. Dennoch zeigen diese Ergebnisse, wie wichtig eine umfassende ökologische Bewertung ist, um Trade-offs zu identifizieren. Auch wenn der CO₂-Fußabdruck erheblich reduziert werden kann, kommt es zu einem Anstieg in anderen Wirkungskategorien. Um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können, ist eine umfassende Bewertung erforderlich.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse auch, dass mit zunehmender Dekarbonisierung des Strommixes der Anteil der Produktionsphase an den Lebenszyklusemissionen steigt. In Szenario 1 macht die Produktionsphase 12% des CO₂-Fußabdrucks aus, während dieser Anteil in Szenario 2 auf 24% verdoppelt. Bei einer isolierten Betrachtung des Jahres 2042 liegt der Anteil der Produktionsphase bei 39%. Dieser Trend zeigt deutlich, dass es zunehmend relevanter werden wird, die Produktion von Wärmepumpen als Stellschraube zur Verringerung der Umweltwirkungen zu sehen. Es müssen mittelfristig Konzepte zur Kreislaufführung und Wiederaufbereitung der verwendeten Materialien, sowie zur Effizienzsteigerung der Produktionsprozesse entwickelt werden, um auch die Umweltwirkungen zu reduzieren, die der Produktion zugeschrieben werden.

Die vorgestellten Ergebnisse sind mit früheren Studien vergleichbar. Greening et al. [9] ermittelten in ihrer vergleichenden LCA-Studie verschiedener Wärmepumpen und eines Gaskessels einen CO₂-Fußabdruck von 0,28 kg CO₂ eq/kWh_{th}. Die Studie wurde 2010 veröffentlicht, was den geringen Anteil der erneuerbaren Energien von 5% im verwendeten Strommix erklärt. Außerdem wurden Transportemissionen mit einbezogen, die in diesem Papier nicht berücksichtigt werden. Die AutorInnen untersuchten verschiedene Szenarien für die EE-Durchdringung des Netzes und deren Einfluss auf die Umweltbilanz der Wärmepumpe. Sie fanden ein 50%iges

Emissionsreduktionspotenzial, wenn der EE-Anteil im Strommix von 5% auf 80% erhöht wird [9].

Eine neuere Studie ergab einen CO₂-Fußabdruck von 0,11 kg CO₂ eq/kWh_{th} für die Produktions-, Installations- und Nutzungsphase [12]. Der verwendete Strommix ist der italienische Strommix. Die Lebensdauer des Systems wurde mit 25 Jahren angenommen. Dies steht im Einklang mit den in dieser Studie vorgestellten Ergebnissen, da Szenario 1 höhere Auswirkungen pro kWh_{th} aufweist, da es nur eine Systemlebensdauer von 20 Jahren berücksichtigt. Die Sensitivitätsanalyse, die den dynamischen Strommix für eine Lebensdauer von 25 Jahren einbezieht, zeigt einen deutlich niedrigeren Wirkungswert von 0,07 kg CO₂ eq/kWh_{th}.

Schließlich haben Kägi et al. [11] LCI-Daten für verschiedene Wärmepumpen und andere Komponenten im Jahr 2021 veröffentlicht. Sie berechneten einen CO₂-Fußabdruck für die Produktion einer 7 kW (256 kg) LWWP mit 3060 kg CO₂ eq. Da der Betrieb, auf den sich die 7 kW Nennleistung beziehen, nicht angegeben ist, wird das Gewicht der Wärmepumpe zum Vergleich herangezogen. Bezogen auf das Gewicht sind die Auswirkungen der Wärmepumpenproduktion in diesem Papier etwas höher als die von Kägi et al. berechneten Werte. Diese Abweichung kann auf Skalierungseffekte oder die zugrunde liegenden Energiemixe zurückzuführen sein.

Insgesamt liegen die vorgestellten Ergebnisse im Vergleich zu anderen LCA-Studien in einem erwartbaren Bereich. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die vorgestellten Ergebnisse gewissen Einschränkungen unterliegen. In erster Linie ist die künftige Entwicklung der Stromerzeugung unbekannt, so dass die Vorhersagen mit einem hohen Maß an Unsicherheit behaftet sind. Dennoch wurde gezeigt, dass es essenziell ist, diese Vorhersagen zu berücksichtigen. Die verwendete Vorhersage für den Strommix erfolgte nach wirtschaftlichen Optimierungsprinzipien und spiegelt nicht unbedingt die tatsächliche Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten wider [6]. In der Studie wurden mehrere Szenarien für die Entwicklung des Netzmixes vorgestellt, jedoch wurde in dieser Untersuchung nur das Referenzszenario umgesetzt. Ein breiteres Verständnis des Einflusses des Strommixes auf den ökologischen Fußabdruck des Betriebs des vorgestellten Heizsystems kann durch die Einbeziehung weiterer Szenarien erreicht werden.

Zur Verringerung der Komplexität wurde keine Verschlechterung des Systems berücksichtigt. Außerdem wurden ein konstanter jährlicher Strombedarf und eine konstante Wärmeproduktion angenommen. Abhängig von den Wetterbedingungen und der mittelfristigen Klimaentwicklung werden beide Werte jedoch von Jahr zu Jahr schwanken. Eine tieferegehende Analyse, die historische Überwachungsdaten von Heizungsanlagen in Kombination mit Wetterdaten einbezieht, könnte in dieser Hinsicht wertvolle Erkenntnisse liefern.

Zuletzt ist auch anzumerken, dass das Ende der Lebensdauer des Systems, sowie der Transportaufwand in diesem Beitrag noch nicht berücksichtigt sind. Dies kann zu einer

Unterschätzung der Umweltwirkungen führen und wird in einer späteren Phase des Forschungsprojekts adressiert.

Die Auswirkungen in der Kategorie *Ressourcenverbrauch, Mineralien und Metalle* sind die einzigen in dieser Analyse, die durch die Integration des dynamischen Strommodells ansteigen. Erneuerbare Energien benötigen in ihrer Produktion mehr Materialien und seltene Erden als fossile Energiesysteme. Diese Entwicklung verdeutlicht die Notwendigkeit einer konsequenten Umstellung der linearen Lieferketten auf eine Kreislaufwirtschaft. Die Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft wird nicht nur die Auswirkungen des Strommixes verringern, sondern auch die Auswirkungen, die der Produktionsphase des Heizsystems selbst zugeordnet sind. Der Kreislauf von Ressourcen wird in naher Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Er ist ein wesentlicher Bestandteil, um den ökologischen Fußabdruck zu minimieren und gleichzeitig die Versorgungssicherheit bei verschiedenen Ressourcen langfristig zu gewährleisten.

SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Strommix einen erheblichen Einfluss auf die ökologische Wirkung eines kombinierten Solarthermie- und Luft-Wasser-Wärmepumpensystems hat. Während die Auswirkungen in den Kategorien *Klimawandel* und *Ökotoxizität* mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien abnehmen, sind die Auswirkungen auf die Kategorie *Ressourcenverbrauch in Szenario 2* höher als in Szenario 1. Wenn für die Berechnung der Umweltauswirkungen des Wärmepumpen- und Solarthermie-Systems ein konstanter Stromnetzmix angenommen wird, sind die Ergebnisse - je nach Kategorie - eine Über- oder Unterschätzung der tatsächlichen Auswirkungen. Insbesondere wenn diese Ergebnisse mit anderen Technologien verglichen werden, die in der Nutzungsphase wenig oder keinen Strom verbrauchen, ist dies ein wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden muss, da dies sonst zu einem unfairen Vergleich führen kann.

Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Dekarbonisierung des Stromnetzmixes, insbesondere im Hinblick auf den geplanten Einsatz von Wärmepumpen. Gleichzeitig ist die Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft ein zentrales Thema, das angegangen werden muss, da der Ressourcenverbrauch einen kritischen Punkt darstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei linearen Lieferketten die Auswirkungen des *Ressourcenverbrauchs* mit dem Einsatz von erneuerbaren Energien weiter zunehmen werden. Für eine nachhaltige Transformation muss der Materialkreislauf geschlossen werden.

Während in dieser Bewertung der Schwerpunkt auf einem bestimmten Szenario für die Entwicklung des Netzmixes lag, sollten künftige Studien eine Vielzahl möglicher Entwicklungen des Strommixes bewerten, um diesbezügliche Sensitivitäten zu testen und potenzielle Trade-offs zwischen verschiedenen Entwicklungsszenarien zu identifizieren.

DANKSAGUNG

Die AutorInnen möchten sich beim gesamten Projektteam für die Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Ein besonderer Dank geht an unsere Kollegen Matthieu Chaigneau, Stephan Bachmann und Björn Nienborg für die Durchführung der Systemsimulation in PolySun und die Bereitstellung der relevanten Performance-Parameter für diese Analyse.

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) geförderten Projekts "Effizientes Heizen" (Förderkennzeichen: 03EN6014A/B) erstellt. In dem Projekt arbeiten Experten führender Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen über einen Zeitraum von dreieinhalb Jahren an der Entwicklung und Anwendung einer ganzheitlichen Bewertungsmethodik für die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeitsbewertung von solarbasierten erneuerbaren Heizsystemen im Vergleich zu alternativen Systemen.

LITERATUR

- [1] Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien in Zahlen. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>. Zuletzt geprüft am: 23.02.2024.
- [2] Bundesverband Wärmepumpe e.V., "Branchenstudie 2023: Marktentwicklung - Prognose - Handlungsempfehlungen.," Berlin, Germany, 2023.
- [3] *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen: Deutsche und Englische Fassung*, DIN EN ISO 14044, 2006.
- [4] *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen: Deutsche und Englische Fassung*, DIN EN ISO 14040, 2009.
- [5] European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability, *International reference life cycle data system (ILCD) handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors*, Luxembourg, Publications Office, 2011.
- [6] J. Brandes *et al.*, "Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen," Update November 2021: Klimaneutralität 2045, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2021.
- [7] B. Burger, Energy-Charts. Online verfügbar unter: <https://www.energy-charts.info/index.html?l=de&c=DE>. Zuletzt geprüft am: 23.02.2024.
- [8] F. Bumann, F. Panitz, and C. Felsmann, "Ganzheitliche Bewertung von Wärmepumpensystemen," Technische Universität Dresden, 2023.

- [9] B. Greening and A. Azapagic, "Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK," *Energy*, vol. 39, no. 1, S. 205–217, 2012.
- [10] G. Ioannis, "Environmental Performance Assessment of Heat Pumps," Masterarbeit, School of Science and Technology, International Hellenic University, Thessaloniki, Griechenland, 2014.
- [11] T. Kägi *et al.*, "Life Cycle Inventories of Heating Systems: Heat from natural gas, biomethane, district heating, electric heating, heat pumps, PVT, wood, cogeneration," Carbotech AG, Zürich, 2021.
- [12] A. C. Violante *et al.*, "Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump," *Renewable Energy*, vol. 188, S. 1029–1037, 2022.
- [13] G. Wernet *et al.*, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, no. 9, S. 1218–1230, 2016.
- [14] H. Bahlawan *et al.*, "Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by accounting for scaling effects," *Applied Thermal Engineering*, vol. 171, S. 115062, 2020.
- [15] G. Naumann, E. Schropp, and M. Gaderer, "Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Gas Boiler Using an Attributional and a Consequential Approach," *Procedia CIRP*, vol. 105, S. 351–356, 2022.