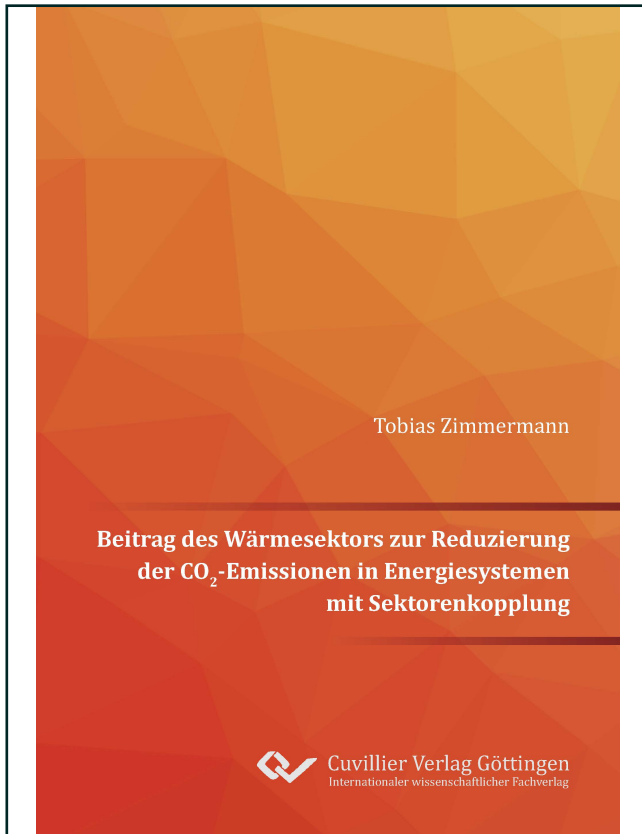




Tobias Zimmermann (Autor)

Beitrag des Wärmesektors zur Reduzierung der CO₂-Emissionen in Energiesystemen mit Sektorenkopplung



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8543>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

Mit dem Abkommen von Paris hat sich die internationale Staatengemeinschaft das gemeinsame Ziel gesetzt, die Erderwärmung auf unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen und nach Möglichkeit sogar eine Erwärmung von maximal 1,5 °C nicht zu überschreiten [1, 2]. In der nationalen Umsetzung strebt die Bundesregierung für Deutschland bis zum Jahr 2050 eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 an [1]. Dabei gelten die Integration von erneuerbaren Energien (EE) sowie die Steigerung der Effizienz als zentrale Maßnahmen [1, 3].

Bisher war die deutsche Energiewende stark auf den Stromsektor fokussiert [4]. Durch den Ausbau der auf EE basierenden Stromerzeugungskapazitäten, insbesondere Windkraft und Photovoltaik, konnte der Anteil der EE an der Stromversorgung kontinuierlich gesteigert und die spezifischen CO₂-Emissionen gesenkt werden. Im Jahr 2018 lag der Anteil der EE an der Stromversorgung bereits bei 37,8 %. Da in den anderen Sektoren des Energiesystems die Nutzung der EE allerdings stagniert, liegt der Anteil der EE bezogen auf den gesamten deutschen Primärenergiebedarf erst bei knapp 14 %. [4]

Betrachtet man den Endenergiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2018, so sind fast 50 % auf die Bereitstellung von Wärme zurückzuführen. Die andere Hälfte wird zu ungefähr gleichen Anteilen durch den Stromsektor und den Verkehrssektor nachgefragt. Wenn also das gesamte Energiesystem in Deutschland emissionsarm und auf Basis hoher Anteile erneuerbarer Energien gestaltet werden soll, bedarf es insbesondere einer umfassenden Umstellung des Wärmesektors als dem größten Nachfragebereich. Die Ziele sind hier einerseits die Senkung des Energiebedarfs durch Effizienzsteigerungen und Sanierungsmaßnahmen, andererseits die zunehmende Integration von Wärme aus EE [3]. Jedoch lag der erneuerbare Anteil an der Endenergiebereitstellung im Wärmesektor im Jahr 2018 bei lediglich 14,4 % [4]. Auch die Sanierungsraten im Gebäudebereich bleiben deutlich hinter den gesetzten Zielen zurück [3].

Das Konzept der Sektorenkopplung gilt in diesem Kontext als vielversprechender Baustein auf dem Weg zu einem nachhaltigen Gesamtsystem. Es sieht vor, Synergieeffekte

zwischen den einzelnen Sektoren zu nutzen, um das Energiesystem als Ganzes effizienter und emissionsärmer gestalten zu können. Dazu gehört es, regenerativ erzeugte Energie aus dem Stromsektor auch in anderen Sektoren durch fortschreitende Elektrifizierung zu nutzen, um von den Erfolgen des Stromsektors zu profitieren. Auch kann Wasserstoff oder synthetisches Erdgas sektorenübergreifend als Energieträger genutzt werden und führt somit zu einer Vielzahl von möglichen Verknüpfungen zwischen den Sektoren des Energiesystems.

1.1. Motivation

Bisher sind die Sektoren des Energiesystems nahezu vollständig entkoppelt. Abseits der Kraft-Wärme-Kopplung gibt es kaum Wechselwirkungen der Sektoren Wärme und Verkehr mit dem Stromsektor, die eine ganzheitliche Betrachtung notwendig machen. Technologische Veränderungen, wie bspw. der zunehmende Einsatz von elektrisch betriebenen Wärmepumpen oder die steigende Elektromobilität, machen jedoch eine gesamtheitliche Analyse des deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung notwendig.

Dazu muss zunächst der Energiebedarf sowie die (erneuerbare) Energiebereitstellung in hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung vorliegen. Während es für den Stromsektor schon einige entsprechende Untersuchungen gibt, sind für die anderen Nachfragesektoren nur wenige bis keine Daten in benötigter Auflösung verfügbar. In dieser Arbeit soll daher zunächst eine Charakterisierung des derzeitigen Nutz- und Endenergiebedarfs des Wärmesektors erfolgen und davon ausgehend mögliche Entwicklungspfade bis zum Jahr 2050 untersucht werden. Ein Fokus liegt dabei auf der Ermittlung von zeitlich und örtlich hoch aufgelösten Ganglinien dieser Energiebedarfe.

Für eine Gesamtsystems simulation werden die gewonnenen Erkenntnisse mit Modellen zur Entwicklung des Strom- und Verkehrssektors [5, 6] gekoppelt. So können fundierte Aussagen über die Zusammenhänge in einem sektorengekoppelten Energiesystem getroffen und die Rolle des Wärmesektors eingehend analysiert werden.

1.2. Vorgehensweise

Zunächst wird im Rahmen einer Literaturrecherche die aktuelle Situation im deutschen Energiesystem aufgezeigt. Dabei wird ein Fokus auf den Wärmesektor und dessen Fortschritt im Rahmen der Energiewende gelegt, um somit die Ausgangssituation für die Modellierung in dieser Arbeit klar zu definieren.

In Kapitel 3 wird die Methodik dieser Modellierung des Wärmesektors umfassend dargestellt. Dabei wird der Wärmesektor in die Verbraucherbereiche „Haushalte“, „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD) sowie „Industrie“ unterteilt. Für jeden dieser drei Teilbereiche wird ein passender Ansatz zur Charakterisierung des Wärmebedarfs entwickelt, wobei das Ziel die Ermittlung von stündlichen Ganglinien des Nutzenergiebedarfs zur Wärmeversorgung (Wärmeganglinien) auf regionaler Ebene ist. Außerdem wird die Anlagenstruktur der Wärmeversorgung abgebildet, um in Kombination mit Technologiemodellen eine Überführung von Nutz- in Endenergie-Ganglinien zu ermöglichen. Diese fließen in einem abschließenden Schritt in ein gekoppeltes Gesamtmodell des deutschen Energiesystems ein, welches in Kapitel 4 näher erläutert wird.

In Kapitel 5 werden verschiedene Szenarien für die mögliche Entwicklung in den einzelnen Verbraucherbereichen des Wärmesektors bis zum Zieljahr 2050 definiert. Im Anschluss an eine Validierung des Modells des Wärmesektors werden in Kapitel 6 die definierten Szenarien mittels Simulationsrechnungen unter anderem in Bezug auf den vorherrschenden Nutz- und Endenergiebedarf sowie die resultierenden CO₂-Emissionen untersucht. In Kombination mit dem gekoppelten Energiesystemmodell werden anschließend in Kapitel 7 Aussagen zu den Auswirkungen auf das Gesamtsystem hinsichtlich der CO₂-Emissionen, des (elektrischen) Energiebedarfs sowie weiterer relevanter Kennzahlen getätigt.

2. Status Quo des deutschen Energiesystems

In diesem Kapitel soll zunächst die Ausgangslage des deutschen Energiesystems dargelegt werden. Hierbei wird der aktuelle Stand der Energiewende, allgemein und in den einzelnen Sektoren, näher beleuchtet und die Bedeutung des Wärmesektors herausgearbeitet. Weiterhin wird der aktuelle Stand der Wissenschaft zur Betrachtung des Wärmesektors im Kontext der Energiesystemanalyse in Abschnitt 2.2 kurz dargelegt.

Wie bereits erläutert, soll die Senkung der Treibhausgasemissionen im Zuge der Energiewende insbesondere durch die Senkung des Energiebedarfs sowie die Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien gelingen. Einordnend wird daher zunächst die bisherige Entwicklung aufgezeigt. In Abbildung 1 ist die Entwicklung des jährlichen Endenergiebedarfs in Deutschland seit dem Referenzjahr 1990, unterteilt in die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr, dargestellt. Der summierte jährliche Endenergiebedarf liegt im Jahr 2018 bei ca. 2.413 TWh/a und hat gegenüber dem Referenzjahr eine Abnahme um etwa 10 % verzeichnet. Der Wärmesektor trägt fast 50 % zu diesem Endenergiebedarf bei und weist die größte Abnahme seit 1990 auf (-23 %). Der Bruttostromverbrauch (2018: 595 TWh/a) sowie der Endenergiebedarf des Verkehrssektors (2018: 644 TWh/a) liegen in der gleichen Größenordnung und haben seit 1990 jeweils eine leichte Zunahme erfahren. [4]

Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Endenergiebereitstellung in den betrachteten Sektoren weist deutlich unterschiedliche Entwicklungen auf. Der Stromsektor als bisheriger Fokus der Energiewende zeigt, angestoßen durch die Fördermechanismen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes [7], die größte Steigerung und erreicht im Jahr 2018 bereits einen Anteil von 37,8 % [4]. Der Stromsektor ist damit zwar derjenige mit dem höchsten Anteil an EE, besitzt jedoch auch den geringsten Endenergiebedarf. Die Sektoren Wärme und Verkehr verzeichnen in den letzten Jahren eine Stagnation des Anteils an EE und liegen im Jahr 2018 bei 14,4 % bzw. 5,6 % [4].

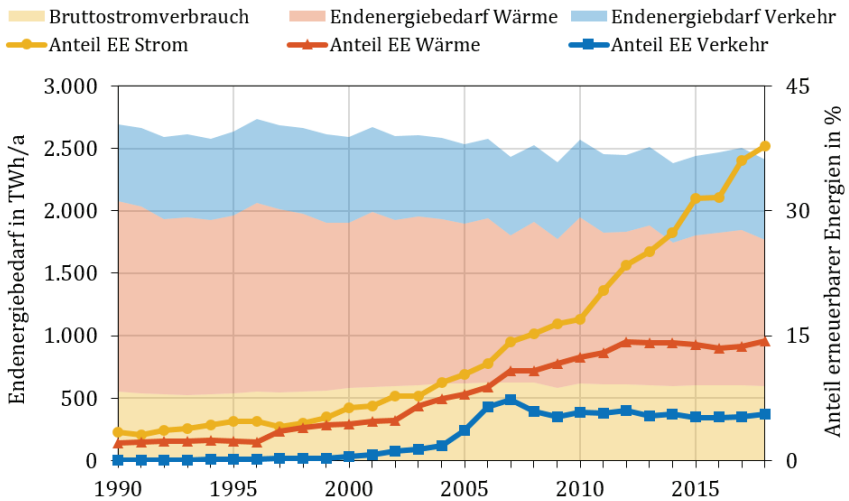


Abbildung 1: Entwicklung des Endenergiebedarfs sowie des Anteils erneuerbarer Energien (EE) in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr in der Bundesrepublik Deutschland im zeitlichen Verlauf nach [4]

Die Entwicklung der deutschen CO₂-Emissionen ist im zeitlichen Verlauf, differenziert nach den Sektoren, in Abbildung 2 dargestellt. In der Summe ist zwischen 1990 und 2018 eine Abnahme der CO₂-Emissionen um 28 % zu verzeichnen. Der Verkehrssektor liegt dabei 2018 mit 160 Mt/a ungefähr auf dem Niveau von 1990, während die Sektoren Strom und Wärme mit jeweils ca. 270 Mt/a in etwa die gleichen absoluten CO₂-Emissionen im Jahr 2018 aufweisen. Die bisher größte Senkung der CO₂-Emissionen konnte im Wärmesektor mit etwa 40 % gegenüber 1990 erreicht werden. Dies geht sowohl auf die zuvor besprochene Senkung des Endenergiebedarfs als auch auf einen zusätzlichen Brennstoffwechsel von Heizöl und Kohle zum Endenergieträger Erdgas zurück [8].

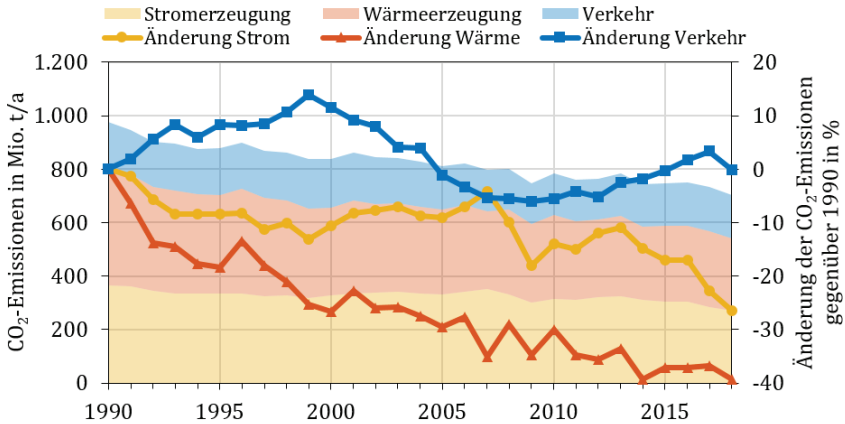


Abbildung 2: Entwicklung der absoluten CO₂-Emissionen und deren Änderungen gegenüber 1990 in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr in der Bundesrepublik Deutschland im zeitlichen Verlauf nach [9, 10]

2.1. Charakterisierung des Wärmesektors

Wie zuvor gezeigt, ist knapp die Hälfte des deutschen Endenergiebedarfs dem Wärmesektor zuzuordnen. Für eine genauere Betrachtung ist in Abbildung 3 der Endenergiebedarf des Wärmesektors für das Jahr 2015 weiter differenziert.

Die linke Seite der Abbildung zeigt die Verteilung des absoluten Endenergiebedarfs auf die Anwendungszwecke (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) in den Verbraucherbereichen Haushalt, GHD sowie Industrie. Es ist zunächst erkennbar, dass die Haushalte mit ca. 570 TWh/a den größten Bedarf aufweisen, gefolgt von der Industrie. Beide Verbraucherbereiche machen gemeinsam über 80 % des Endenergiebedarfs für Wärmeanwendungen aus. Während der Haushalts- und der GHD-Bereich durch Raumwärme dominiert werden, wird in der Industrie insbesondere Prozesswärmebedarf nachgefragt. [11]

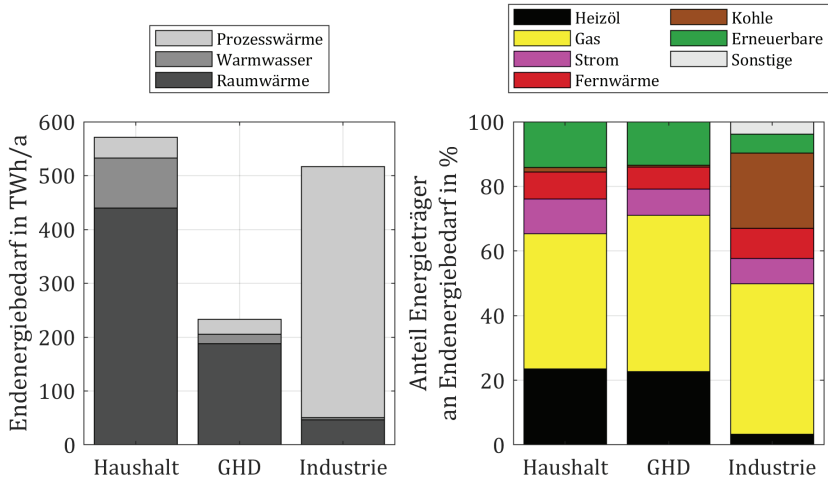


Abbildung 3: Endenergiebedarf zur Wärmebereitstellung im Jahr 2015 in den Verbraucherbereichen Haushalt, GHD und Industrie. Links: Absolut Endenergiebedarf nach Anwendungszweck. Rechts: Prozentuale Verteilung der Endenergieträger am Endenergiebedarf im Wärmesektor, eigene Darstellung nach [11]

Die rechte Seite der Abbildung zeigt die Verteilung des Endenergiebedarfs auf verschiedene Endenergieträger. In allen drei Verbraucherbereichen ist Erdgas der maßgebliche Endenergieträger. In den Verbraucherbereichen Haushalt und GHD, die eine sehr ähnliche Verteilung aufweisen, sind jeweils noch über 20 % durch Heizöl gedeckt, was somit den zweitwichtigsten Endenergieträger darstellt. Der Stromanteil ist insbesondere durch die Prozesswärme (Kochen, Backen, etc.) oder elektrische Durchlauferhitzer zur Warmwasserbereitstellung begründet. Bei der Raumwärmebereitstellung spielt Strom im Jahr 2015 eine untergeordnete Rolle. [11]

Die Industrie zeigt nicht nur bei der Verteilung nach Anwendungszweck, sondern auch bei den Endenergieträgern ein abweichendes Bild. Während Heizöl hier nur einen geringen Anteil deckt, ist Kohle nach Erdgas der wichtigste Endenergieträger zur Wärmebereitstellung. Erneuerbare Energien weisen in der Industrie den geringsten Anteil auf. Insgesamt ist festzustellen, dass die konventionellen Endenergieträger noch den maßgeblichen Anteil zur Wärmebereitstellung in Deutschland liefern, während erneuerbare

Energien heutzutage vor allem in Form von Biomasse zur Raumwärmebereitstellung genutzt werden [4]. Strom als Endenergieträger im Wärmesektor spielt bisher eine untergeordnete Rolle und hat vor allem im Bereich der Raumwärme noch geringe Relevanz.

2.2. Modellierung des Wärmesektors in der wissenschaftlichen Praxis

Wie bereits erläutert, hat sich die deutsche Energiewende bisher vorrangig auf den Stromsektor konzentriert. Zahlreiche Studien zur Transformation des Energiesystems haben den Wärmesektor vernachlässigt bzw. nur am Rande betrachtet [12–15]. Erst in den letzten Jahren finden die Sektorenkopplung und damit die Abbildung der anderen Verbrauchssektoren Eingang in die wissenschaftliche Diskussion. So wird der Wärmesektor auch in Gesamtsystemstudien integriert [16–19]. Palzer führt in [19] bspw. eine Analyse durch, bei der die Untersuchung des gesamten Energiesystems unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung und deren optimale Entwicklung im Fokus steht. Dabei basiert die Simulation auf einem deutschlandweiten Modell ohne weitere regionale Differenzierung. Nur sehr wenige Studien, die den Wärmesektor in die Untersuchung des Gesamtsystems einbeziehen, berücksichtigen eine regionale Auflösung des Sektors [20]. Aufgrund der starken Abhängigkeit des Wärmebedarfs von klimatischen Bedingungen sollte neben einer hohen zeitlichen Auflösung auch eine regionale Auflösung erfolgen. Dies gilt insbesondere in einem Energiesystem, welches von den ebenso wetterabhängigen erneuerbaren Energien auf Basis von Sonnen- und Windenergie geprägt ist.

In den letzten Jahren wurden auch einige separate Betrachtungen des Wärmesektors vorgenommen [21–23]. Oftmals wird im Wärmesektor jedoch nur der Verbraucherbereich der Haushalte adäquat abgebildet, da Wohngebäude einen großen Teil zum Energiebedarf des Wärmesektors beitragen und zudem zahlreiche statistische Daten verfügbar sind. Dem Wärmesektor wird für die Erreichung der CO₂-Emissionsziele eine hohe Relevanz zugesprochen und das Ziel eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands ausgewiesen [1, 24]. Kotzur [25] ermittelt in seiner Dissertation zukünftig entstehende Belastungen des elektrischen Netzes durch den Wohngebäudebereich und bildet dafür den Haushaltssektor auf regionaler Ebene im Rahmen eines Optimierungsmodells ab. Auch Heitkoetter *et al.* [26] bestimmen in ihrer Veröffentlichung den regionalen Wärmebedarf

des Wohngebäudebestands und leiten daraus das Power-to-Heat Potenzial dieses Verbraucherbereichs her.

Die Industrie wird trotz des hohen Anteils am Wärmebedarf meist vernachlässigt. Dies liegt vermutlich auch an der schlechten Datengrundlage, insbesondere in Bezug auf zeitlich und regional aufgelöste Energiebedarfe. Eine Ausnahme bildet bspw. Beer, der in [27] ein *regionalisiertes Energiemodell* entwickelt, in dem für die unterschiedlichen Anwendungssektoren Strom- und Wärmebedarfsprofile ermittelt werden. Der Fokus der Untersuchung liegt insbesondere auf der zentralen Wärmeerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Fernwärmenetzen und deren Betriebsweise, während die dezentrale Wärmeerzeugung keine genauere Betrachtung findet. Das kürzlich beendete Forschungsvorhaben *DemandRegio* [28] hatte zum Ziel, regional und zeitlich aufgelöste Energiebedarfe zu ermitteln. Die Ergebnisse stellen Strom- und Gasbedarfsganglinien auf Ebene der Landkreise dar, die für weitere Betrachtungen verwendet werden können und die Verbraucherbereiche Haushalt, GHD sowie Industrie einbeziehen. Jedoch wird der Wärmebedarf dabei nicht explizit herausgearbeitet.