

## Nutzung industrieller Abwärme - Abhängig von der zukünftigen Energienachfrage der Industriestandorte in Europa

**Pia Manz**

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe

E-Mail: pia.manz@isi.fraunhofer.de

### **Abstract**

Die Nutzung industrieller Abwärme kann zur Transformation des Energiesystems beitragen, da die innerbetriebliche und überbetriebliche Nutzung von Abwärme sowie die Integration in Fernwärmenetze den Primärenergiebedarf des Wärmesektors reduziert. Zur Abschätzung dieses Potenzials müssen Industrieanlagen in hoher räumlicher Auflösung hinsichtlich des Wärmebedarfs und ihrer Abwärmepotenziale analysiert werden. Mithilfe verschiedener Datenbanken sowie der Modellierung der zukünftigen Entwicklung der industriellen Endenergienachfrage können standortspezifische Abwärmepotenziale für Industrieanlagen in Europa quantifiziert werden. Verschiedene Datenquellen werden verwendet und abgeglichen, um Informationen über CO<sub>2</sub>-Emissionen, Subsektor, Prozess- und Produktionskapazitäten pro Standort in der EU28, der Schweiz und Norwegen zu erhalten. Aus diesem Datensatz energieintensiver Industrien (Stahl, Papier, Zement und Glas) werden die Energienachfrage und die Abwärmepotenziale für jeden Standort und Prozess berechnet. Mit der Kopplung eines nationalen Energienachfragemodells kann die Veränderung der Abwärmepotenziale durch Effizienzgewinne und Prozesswechsel für die wichtigsten Industriezweige in Europa bis 2050 abgeschätzt werden.

### **1. Einleitung**

Das Ziel der EU, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu senken, erfordert die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energien und die Verbesserung der Energieeffizienz in allen Nachfragesektoren. Während der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in den letzten zehn Jahren zugenommen hat, ist der Wärmesektor nach wie vor stark von fossilen Energieträgern abhängig. In der EU28 beträgt der Raumwärmebedarf etwa 25 % und der industrielle Prozesswärmebedarf etwa 16 % des Endenergieverbrauchs [1]. Diese Zahlen verdeutlichen die Bedeutung von Wärmebedarf und -angebot in Industrie und Gebäuden. Industrielle Abwärme als potenzielle Quelle für Fernwärme kann zur Verbesserung der Effizienz und Dekarbonisierung des Wärmesektors beitragen und sollte eine wichtige Rolle in der kommunalen Wärmeplanung spielen. Für die Abschätzung regionaler Abwärmepotenziale und die Identifizierung potenzieller Regionen für Fernwärme sind jedoch disaggregierte Informationen über die Standorte energieintensiver Anlagen erforderlich.

Bis vor kurzem wurde das Potenzial industrieller Abwärme kaum untersucht und nur wenige Studien haben einen systematischen Ansatz zur Abschätzung des standortspezifischen Abwärmepotenzials vorgelegt. Die Quantifizierung von Abwärmepotenzialen erfolgt häufig auf Basis von standortspezifischen Emissionsdaten mithilfe von Emissionsfaktoren. Dieser Ansatz wird hauptsächlich durch die Datenverfügbarkeit getrieben. Nur einige wenige Studien berücksichtigen spezifischere Branchendatenbanken, die auch andere Indikatoren einbeziehen. Angaben über die Produktion und Prozesse der einzelnen Standorte sind ein genauerer Indikator als der CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Darüber hinaus ist die zukünftige Verfügbarkeit von Abwärme essentiell für eine langfristige Planung. Abwärmepotenziale können sich insbesondere in den energieintensiven Subsektoren durch Wechsel zu CO<sub>2</sub>-ärmeren Prozessen sowie von Brennstoffen (bspw. Elektrifizierung) substantiell verändern.

## 2. Standortdatenbank

Die Erfassung von georeferenzierten Produktionskapazitäten energieintensiver Prozesse ermöglicht es, Abwärmepotenziale auf verschiedenen Temperaturniveaus abzuschätzen. Dies bedeutet, dass anlagenscharf erfasst wird, wie viel Tonnen Stahl, Papier oder Zement pro Jahr mit welchem Prozess (Hochofen oder Elektrostahl etc.) produziert werden. Ziel ist es, einen georeferenzierten Datensatz von energieintensiven Industrien, einschließlich Emissionen, Prozessen, Produktionskapazitäten sowie Energieverbrauch der einzelnen Standorte zu erhalten. Dafür werden mehrere Datenbanken miteinander verschnitten, darunter EU ETS (European Union Emission Trading System), E-PRTR (European Pollutant Release- and Transferregister) und verschiedene sektorale Datenbanken (Glas, Zement, Stahl und Papier). Einen Überblick über die verwendeten Datenbanken gibt Tabelle 1. Die Kombination der Datenbanken erfordert einen datenbankübergreifenden Abgleich einzelner Anlagen und ermöglicht die Erfassung der georeferenzierten Produktionskapazität in den energieintensiven Industriesubsektoren in Europa. Dies ermöglicht die Abschätzung des Energiebedarfs und der Abwärmepotenziale für über 30 Prozesse. Die zukünftige Entwicklung der industriellen Produktionsprozesse und der Ausschöpfung von Energie- und Materialeffizienzpotenzialen verändert zum einen die Energieträgerzusammensetzung von Industrieanlagen und zum anderen auch den Gesamtenergiebedarf. Dies hat zur Folge, dass sich Abwärmepotenziale in Zukunft für das gleiche Endprodukt unterscheiden können.

**Tabelle 1: Überblick über die verwendeten Datenbanken und den verfügbaren Informationen**

Datenbank	Firma		Geografische Angaben		Produkt	Produktionsdaten		
	Name	Adresse	Land	Lat/ Long	Produkt/ NACE	Produktion	Kapazität	Emissionen
E-PRTR	X	X	X	X	X			X
ETS	X		X		X			X
Zement (Global Cement Directory)	X		X				X	
Papier (RISI Pulp and Paper)	X		X	X	X	X		
Stahl (VDEh)	X		X				X	
Glas (glassglobal)	X	X	X		X	X		

Häufig verwendete Datenbanken zur Abschätzung von Abwärme sind das E-PRTR [2], das EU ETS [3] und nationale Schadstoffdaten [4, 5]. Die E-PRTR-Datenbank enthält Koordinaten, Schadstoff- und Treibhausgasemissionen für Industriestandorte in der EU, klassifiziert nach vierstelligen NACE<sup>1</sup>-Codes in den definierten Subsektoren von Eurostat, dem statistischen Amt der Europäischen Union. Für den Aufbau der Standortdatenbank wurde das E-PRTR mit der ETS-Datenbank abgeglichen, die 40% der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EU abdeckt, aber lediglich die Adressen der Firmenzentrale angibt. Die Subsektoren in dieser Datenbank werden durch 40 verschiedene Aktivitäten definiert, die das produzierte Produkt kennzeichnen. Die Kombination dieser beiden Datenbanken durch den Abgleich einzelner Industrieanlagen mithilfe des Namens, der Adresse und des Subsektors ermöglicht die Georeferenzierung der ETS-Standorte, die mit E-PRTR-Standorten abgeglichen werden können, sowie erfasst dadurch Anlagen, die in einer der beiden Datenbanken fehlen [6]. Die Anzahl der relevanten Einträge, d.h. Industrieanlagen mit Treibhausgasemissionen, beträgt 1600 im E-PRTR und über 4500 im ETS. Diese Zahlen werden unter Ausschluss nicht relevanter Subsektoren und Länder sowie der Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt. Da erwartet wurde, dass die CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerte im ETS-Register genauer erfasst sind, wurde diese Werte verwendet.

<sup>1</sup> fr.: Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne, eine europäische Systematik zur statistischen Klassifizierung von Wirtschaftszweigen

Die resultierende kombinierte ETS- und E-PRTR-Datenbank bildet die Grundlage für die Aufnahme zusätzlicher sektoraler Datenbanken, wie sie in Tabelle 1 aufgeführt sind. Wie bereits erwähnt, ermöglicht die Einbeziehung von prozessspezifischen Produktionskapazitäten oder Jahresproduktionsdaten eine genauere Abschätzung der Abwärmepotenziale. Diese Daten können durch Abgleich mit branchenspezifischen Datenbanken gewonnen werden. Tabelle 1 veranschaulicht, dass die von den ursprünglichen Datenbanken gelieferten Informationen sehr heterogen sind, insbesondere in Bezug auf die sektorale Differenzierung (vierstellige NACE- oder ETS-Aktivität), die Genauigkeit der Standortangabe (Koordinaten, Adresse, Stadt oder Land) sowie der Emissionen oder die Kapazität bzw. effektive Produktion. Die Subsektoren Stahl, Papier, Glas und Zement werden hier einbezogen. Diese machen etwa 40% des industriellen Brennstoffbedarfs aus und haben das höchste Potenzial für die Nutzung von Abwärme, da in diesen Subsektoren Hochtemperaturprozesse üblich sind. Die in den Branchendatenbanken enthaltenen Prozesse sind Klinker-Kalzinierung (Zement), Papierherstellung, Flach- und Behälterglas, Sinterung, Verkokung, Elektrolichtbogenöfen und Hochofen.

Die unterschiedliche Definition von Systemgrenzen war hier eine Herausforderung. So enthält die ETS-Datenbank beispielsweise Emissionen eines gesamten Stahlwerks, aber die verschiedenen Prozesse sind in den Branchendatenbanken aufgeführt. Auch wenn die sektoralen Datenbanken umfangreich sind, gibt es immer noch Einträge aus ETS und E-PRTR, die nicht abgeglichen werden konnten. Umgekehrt mussten Einträge aus den sektoralen Datenbanken, die nicht mit der Emissionsdatenbank abgeglichen werden konnten, manuell georeferenziert werden. Als Ergebnis steht eine Datenbank zur Verfügung, in der 5200 Einträge vorhanden sind. Diese Einträge sind einzelne Industrieanlagen in Europa, jeweils mit Firmenname, Adresse, Koordinaten, Subsektor, Prozessen, Produktionskapazität und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### 3. Energienachfrage und Abwärmepotenziale

#### 3.1 Prozessspezifische Energienachfrage und Status quo Abwärmepotenziale

Aus dem Datensatz mit Emissionen und Produktionskapazität pro Standort können der Brennstoff- und Strombedarf sowie daraus entstehende Abwärmepotenziale abgeleitet werden. Dabei sind prinzipiell zwei verschiedene Ansätze möglich: einer basierend auf der Produktion nach Prozessen und einer basierend auf Emissionsdaten. Die meisten Studien in der Literatur verwenden Emissionen als Grundlage für die Analyse von Abwärme [2, 5]. Für diese Studie wird ein Ansatz basierend auf den Produktionskapazitäten verwendet.

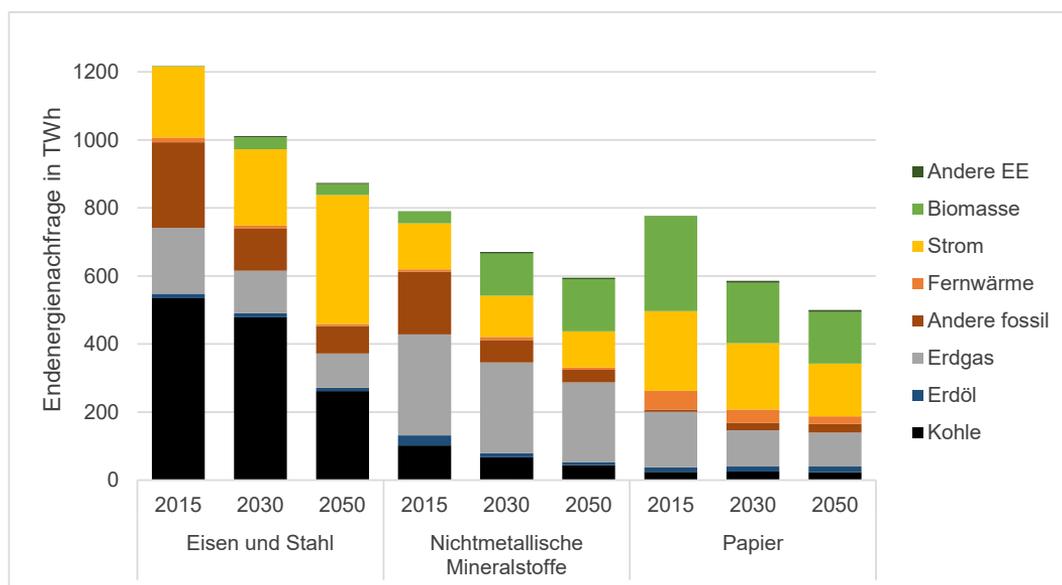
Basierend auf der Literatur wurden spezifische Energieverbräuche in GJ/t definiert [7, 8], die den Brennstoff- und Strombedarf pro Tonne produziertes Produkt für jeden wesentlichen Prozess der betrachteten energieintensiven Industrien angeben. Der theoretische Energieverbrauch in GJ/Jahr wird berechnet, indem diese Werte mit der standortspezifischen jährlichen Produktions- oder Produktionskapazität multipliziert werden. Diese Werte werden durch einen Vergleich mit den Energiebilanzen von Eurostat validiert. Prozesse, die ein Abwärmepotenzial haben, wurden weitergehend basierend auf [3, 7, 9] analysiert. Mithilfe der dort angegebenen Abwärmefaktoren, die prozentual von der Endenergienachfrage Abwärmepotenziale quantifizieren, können produktionsspezifische Abwärmepotenziale in GJ/t angegeben werden. Dies ist in Tabelle 2 für alle hier analysierten Prozesse ersichtlich. Die spezifischen Abwärmepotenziale für jeden Prozess werden dabei für alle Länder identisch angenommen, unterteilt in drei Temperaturbereiche, von 100-200°C, 200-500°C und über 500°C an. Bei den meisten Prozessen basiert das Abwärmepotenzial auf Brennstoffverbrennungsprozessen, wohingegen Elektrolichtbogenöfen in der Stahlherstellung ein Abwärmepotenzial von mehr als 500°C aufgrund ihres Stromverbrauchs haben.

**Tabelle 2: Prozessspezifische Abwärmepotenziale pro Tonne in GJ/t**

Industriesubsektor		Spezifisches Abwärmepotenzial			Quelle/basierend auf
Subsektor	Prozess	100-200°C	200-500°C	>500°C	
Eisen und Stahl	Sintern	-	0.7	-	[3]
Eisen und Stahl	Hochofen	0.3	-	-	[3]
Eisen und Stahl	Lichtbogenofen	-	0.3	0.2	[7,9]
Eisen und Stahl	Koksofen	-	-	1.9-	[3]
Eisen und Stahl	Direktreduktion	-	3.8	-	[7]
Papier	Papierherstellung	0.6	-	-	[3]
Nichtmetallische Mineralstoffe	Behälterglas	-	1.2	-	[7]
Nichtmetallische Mineralstoffe	Flachglas	-	-	2.2	[3]
Nichtmetallische Mineralstoffe	Klinkerbrennen (trocken)	-	0.5	-	[3,9]
Nichtmetallische Mineralstoffe	Klinkerbrennen (halbtrocken)	-	0.6	-	[3,9]
Nichtmetallische Mineralstoffe	Klinkerbrennen (nass)	-	0.8	-	[3,9]

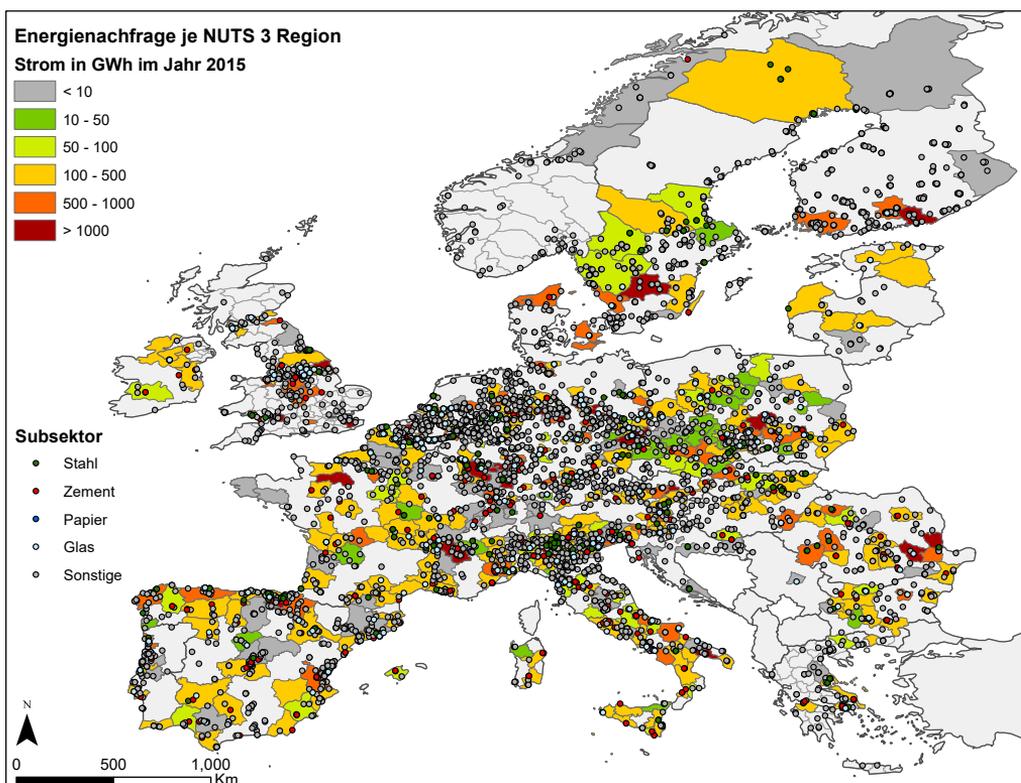
Im Jahr 2015 kann für Europa ein Abwärmepotenzial für die energieintensiven Industriesubsektoren von 63 TWh pro Jahr quantifiziert werden, wobei 60% davon im Temperaturbereich von 200-500°C anfällt. Die Länder Deutschland, Italien, Frankreich und Spanien als Produktionsschwerpunkte der Stahl- und Zementindustrie tragen über 50% zu den europäischen Abwärmepotenzialen bei. Auch sektorale Unterschiede können beobachtet werden: Während die Stahlindustrie durch wenige Standorte mit hohen Abwärmepotenzialen charakterisiert ist, ist die Glas- und Papierherstellung viel kleinteiliger räumlich verteilt und besitzt geringere Abwärmepotenziale pro Standort.

### 3.2 Entwicklung der regionalen Energienachfrage und Abwärmepotenziale in Europa


**Abbildung 1: Entwicklung der energieintensiven Industriesubsektoren in Europa**

Ein Szenario zur Entwicklung der industriellen Endenergienachfrage ist in Abbildung 1 für die Jahre 2015, 2030 und 2050 dargestellt. Berücksichtigt sind dabei die Subsektoren Eisen und Stahl, Papier und Nichtmetallische Mineralstoffe, welcher zum Großteil aus Glas- und Zementherstellung besteht. In diesem Szenario wird von einer ambitionierten Energie- und Materialeffizienzsteigerung ausgegangen. Dies bedeutet einen Rückgang der Endenergienachfrage in allen Subsektoren. Gleichzeitig steigt die Stromnachfrage in der Stahlindustrie an, da fossile Brennstoffe für Prozesswärme durch Elektroöfen oder Lichtbogenöfen ersetzt werden.

Für die Abwärmeschätzung sind diese nationalen Szenarien von Interesse, da hiermit die regionale Endenergienachfrage und somit die Abwärmepotenziale berechnet werden können. In Abbildung 2 ist die regionale Stromnachfrage im Jahr 2015 sowie alle enthaltenen Standorte in der Datenbank nach Subsektor dargestellt. Die regionale Stromnachfrage wird für die energieintensiven Subsektoren mithilfe der georeferenzierten Produktionsdaten berechnet und anschließend mit den nationalen Werten validiert. Die standortspezifische Stromnachfrage wird mithilfe eines Geoinformationssystem(GIS)-Modell für die NUTS<sup>1</sup> 3 Regionen aufsummiert. Diese regionale Einteilung entspricht in Deutschland den Landkreisen bzw. kreisfreien Städten.

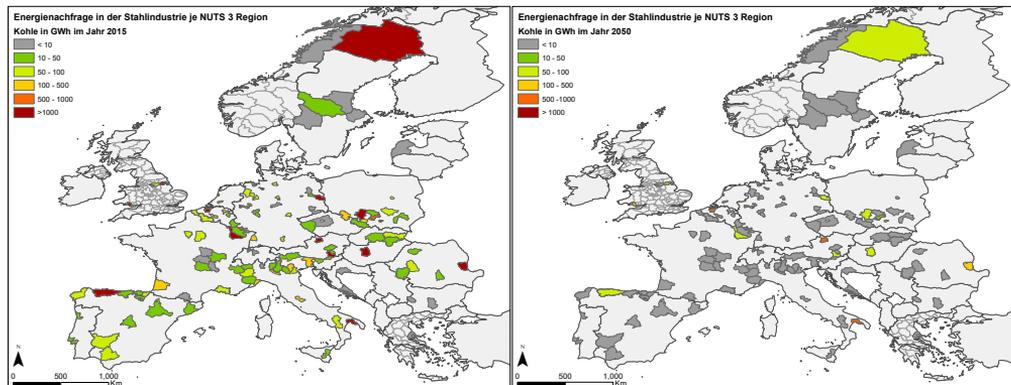


**Abbildung 2: Energieintensive Standorte in Europa und daraus resultierenden Stromnachfrage im Jahr 2015 pro NUTS 3 Region**

Zusammenfassend kann im GIS-Modell mithilfe der nationalen Endenergienachfrage nach Subsektor sowie der standortspezifischen Produktionskapazität die regionale Energienachfrage sowie Abwärmepotenziale identifiziert werden. Unter der Annahme, dass die Produktionskapazitäten in den

<sup>1</sup> fr.: Nomenclature des unités territoriales statistiques, eine europäische Systematik zur statistischen Klassifizierung von Regionen

Standorten zukünftig gleich verteilt sind, kann mit der gleichen Methodik die regionale Energienachfrage nach Subsektor und Energieträger berechnet werden. Allerdings muss dabei auch angenommen werden, dass der Effizienzfortschritt in den einzelnen Standorten dem nationalen Durchschnitt entspricht, und dass Prozesswechsel an allen Standorten ebenfalls gleich der nationalen Entwicklung sind. Hier könnte beispielsweise das Alter von Anlagen noch miteinbezogen werden, die in einigen Datenbanken mit aufgeführt werden. Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurde dies nicht berücksichtigt.



**Abbildung 3: Kohlenachfrage für die Stahlherstellung in den Jahren 2015 und 2050 pro NUTS 3 Region**

Mit der vorgestellten Methodik kann abgeschätzt werden, wie sich regionale industrielle Prozesse verändern und wie viel Abwärme zukünftig zur Verfügung stehen kann. In Abbildung 3 ist die Nachfrage nach Kohle für die Stahlherstellung dargestellt. Die Kohlenachfrage wird hauptsächlich für den Hochofenprozess verwendet, der bis 2050 einen sinkenden Anteil zeigt. Dies bedeutet, dass die Abwärmepotenziale bis 2050 durch Prozesswechsel zu Sekundärstahl und höhere Recyclingquoten um über 40% abnehmen können. Die Bedeutung für die einzelnen Regionen kann mithilfe dieser Daten und möglichen Wärmekonzepten weitergehend analysiert werden.

#### 4. Zusammenfassung

Die Abschätzung der Abwärmepotenziale für energieintensive Prozesse in EU28, Schweiz und Norwegen ergibt ein Bottom-up-Abwärmepotenzial von 63,3 TWh pro Jahr für die Subsektoren Papier, Stahl, Glas und Zement. Der höchste Anteil des industriellen Abwärmepotenzials liegt dabei im Temperaturbereich zwischen 200°C und 500°C. Dies liegt vor allem an der verfügbaren Abwärme des Zementsektors von 25 TWh in diesem Temperaturbereich. Glas und Stahl haben überdurchschnittliche Wärmepotenziale in Temperaturen über 500 °C aus Hochtemperatur-Ofenprozessen. Die tatsächliche Nutzung der identifizierten technischen Abwärmepotenziale hängt dabei von vielen weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise die räumliche Nähe zu einer Wärmesenke. Darüber hinaus ist die zukünftige Verfügbarkeit von industrieller Abwärme essentiell für Wärmeplanungen. So können Energie- und Materialeffizienz sowie Prozess- und Brennstoffwechsel die Potenziale für die regionale Abwärmennutzung verringern. Insbesondere in der Stahlindustrie ist von einem starken Rückgang der Kohlenutzung und damit der Abwärmepotenziale auszugehen. Die Modellierung der zukünftigen Industrienachfrage sowie die räumliche Analyse der Industriestandorte ermöglichen die Abschätzung dieser Potenziale. Gemeinsam mit Daten über regionale Wärmenachfrage nach Temperaturniveau kann das zukünftige ökonomische Potenzial für Fernwärmenetze abgeschätzt werden.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] Fleiter, T.; Elsland, R.; Rehfeldt, M. et al. (2017). Profile of heating and cooling demand in 2015. Report D 3.1 to the European Commission of the project Heat Roadmap Europe 4 (grant agreement No. 695989).
- [2] Persson, U.; Möller, B.; Werner, S. (2014). Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. *Energy Policy* 74, 663-681.
- [3] McKenna, R.C.; Norman, J.B. (2010). Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. *Energy Policy* 38, 5878 - 5891.
- [4] Bühler, F.; Nguyen, T.; Elmegaard, B. (2016). Energy and exergy analyses of the Danish industry sector. *Applied Energy* 184, 1447 - 1459.
- [5] Brückner, S. (2016). Industrielle Abwärme in Deutschland - Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit, Dissertation TU München.
- [6] Fydrich, M. (2017). Assembly of a Site-specific Database for the European Basic Materials Industry - Application for Regional CO<sub>2</sub> Storage Potential. Master's Thesis, Karlsruhe Institute of Technology.
- [7] Rehfeldt, M.; Fleiter, T.; Toro, F. (2017). A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency* DOI 10.1007/s12053-017-9571-y.
- [8] Fleiter, T.; Schlomann, B.; Eichhammer, W. (2013). *Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente*. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart.
- [9] Element Energy, Ecofys, Imperial College London (2014). The potential for recovering and using surplus heat from industry. Final report for the Department for Energy and Climate Change.