

METHODEN ZUR FLEXIBILISIERUNG DES ENERGIEVERBUNDS INDUSTRIE-STADT - EINE TECHNISCHE, ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE ANALYSE

Katharina KARNER^{1*}, Russell McKENNA², Marian KLOBASA³

¹Institut für Energie-, Verkehrs- und Umweltmanagement, FH JOANNEUM, Werk-VI-Str. 46, A-8605 Kapfenberg, +43 3862 33600 8364, katharina.karner@fh-joanneum.at, www.fh-joanneum.at/evu

²Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe, +49 721 608 44582, russell.mckenna@kit.edu, <https://www.iip.kit.edu/>

³Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Straße 48, D-76139 Karlsruhe, +49 721 6809 287., Marian.Klobasa@isi.fraunhofer.de, <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/index.php>

Kurzfassung: Die Dekarbonisierung des Energiesystems ist ein wichtiges Ziel der Europäischen Union. Der Anteil der Industrie am Endenergiebedarf liegt bei 25% (2015) und bietet damit eine gute Ausgangsbasis. Zahlreiche Studien belegen die wirtschaftliche Machbarkeit und die ökologischen Vorteile der Nutzung industrieller Abwärme. Die zeitliche Diskrepanz zwischen dem städtischen Wärmebedarf und der industriellen Abwärme lässt keine 100%ige Nutzung zu. Deshalb ist mehr Flexibilität im Industrie-Stadt Energieverbund gefragt. Bisher konzentrierte sich die Flexibilisierung fast ausschließlich auf den Stromsektor. Dieses Paper schlägt daher Methoden vor, die Flexibilität im Energieverbund Industrie-Stadt ermöglichen, und evaluiert anhand einer Fallstudie, die technische, ökologische und wirtschaftliche Machbarkeit. Flexibilitätsoptionen werden auf der Basis bisheriger Modellierungsansätze integriert. Wärmespeicher, Städteverbünde und industrielle Lastverschiebung werden als Flexibilitätsoptionen betrachtet. Im Gegensatz zu den bisherigen Lastverschiebungsansätzen, die zu niedrigen Stromkosten oder einer Reduzierung der benötigten Regelenergie im Netz führen sollen, werden die industriellen Prozesse und damit die Bereitstellung von industrieller Abwärme so verschoben, dass sie besser auf den städtischen Wärmebedarf abgestimmt sind. Die Fallstudie zeigte, dass die Nutzung von industrieller Abwärme ökologische und ökonomische Vorteile mit sich bringt und den Einsatz von Flexibilitätsoptionen erfordert. Das beste Ergebnis wird durch die Bildung eines Städteverbunds (Verbindung zweier Städte über Fernwärmenetze) und die Integration von Wärmespeichern erreicht. Durch den Einsatz von Flexibilitätsoptionen kann industrielle Abwärme bis zu 100% genutzt werden und ermöglicht die Reduzierung der CO₂-Emissionen auf fast die Hälfte der Ausgangssituation. Die ökonomische Beurteilung der Lastverschiebung in der Industrie ist mit Unsicherheiten behaftet und führt weder ökologisch noch ökonomisch zu einer vorteilhaften Situation. Es wird daher empfohlen, industrielle Abwärme zu nutzen und, wenn sich eine andere Stadt in unmittelbarer Nähe befindet, einen Städteverbund zu bilden oder einen Wärmespeicher zu integrieren. Die Nutzung von industrieller Abwärme und die Integration von Flexibilitätsoptionen erhöht die Energieeffizienz von Industrieunternehmen, die Versorgungssicherheit in Städten und reduziert den CO₂-Ausstoß.

Keywords: industrielle Abwärme, Lastverschiebung, Wärmespeicher, Städteverbünde

1 Einleitung

Die Dekarbonisierung des Energiesystems hängt von der Erzielung signifikanter Verbesserungen der Energieeffizienz sowie der Integration großer Mengen erneuerbarer Energiequellen ab. In diesem Zusammenhang hat der Industriesektor aufgrund seines hohen Anteils am Energiebedarf und seines Beitrags zu (prozess- und energiebedingten) Emissionen zu Recht viel Aufmerksamkeit erhalten [1]. Mehrere Studien haben die großen technischen Potenziale zur Rückgewinnung von industrieller Überschusswärme aufgezeigt [2–5]. Nur wenige Studien gehen über dieses technische Potenzial hinaus, um vorhandene Wärmequellen mit lokalen Senken abzugleichen und/oder die Kosten für die Nutzung dieser Wärmequelle wirtschaftlich zu bewerten [6,7]. Diese Studien zeigen die potenziellen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile der Verbindung von industrieller Abwärme mit lokalen Senken auf, wenn bestimmte De-minimis-Kriterien wie die Wärmebedarfsdichte erfüllt sind.

Industrieunternehmen zeichnen sich in der Regel durch einen hohen Energieeinsatz aus. Damit einher geht die Entstehung von Abwärme, die im Unternehmen nicht genutzt werden kann. Abwärme steht in der Regel als industrielle Energieressource zur Verfügung und kann zur Wärmeversorgung benachbarter Städte genutzt werden. Die Abwärme kann größer oder kleiner als der Wärmebedarf der Stadt sein. Im ersten Fall kann die Stadt jederzeit mit Wärme versorgt werden. Im Gegensatz dazu kann die Stadt im zweiten Fall zu keinem Zeitpunkt vollständig mit Abwärme versorgt werden. Diese beiden Fälle stellen extreme Varianten dar; in Wirklichkeit wird es sich um eine Mischung aus beidem handeln: eine vorübergehende Über- oder Unterversorgung mit industrieller Abwärme. Dadurch stimmt der Bedarf nicht mit dem Angebot überein und das Abwärmepotenzial kann nicht voll ausgeschöpft werden. Dabei stellt sich die Frage:

Wie kann der Energieverbund Industrie- Stadt flexibler gestaltet werden und das Potenzial an industrieller Abwärme besser ausgeschöpft werden?

Auf Grund des saisonal variierenden Wärmebedarfs erfordert der Einsatz von industrieller Abwärme in Fernwärmenetzen weitere flexible Wärmequellen [6]. Hierzu bietet der Einsatz von Speichern [8], die Schaffung von Städteverbänden [9] und die Lastverschiebung in der Industrie die Möglichkeit zur Schaffung von Wärreflexibilität. Ziel ist die Vorstellung und Bewertung dieser Flexibilitätsoptionen anhand eines Fallbeispiels. Die Bewertung der Flexibilitätsoptionen erfolgt anhand der Indikatoren: Deckungsgrad, CO₂-Emissionseinsparung und Kosten (Barwert).

2 Überblick Stand der Technik

Der Stand der Technik zeigt, dass industrielle Abwärme bereits in zahlreichen Studien Gegenstand der Forschung war. Industrieller Abwärme wird entweder in anderen Industriebetrieben oder in naheliegenden Städte zur Wärmeversorgung eingesetzt.

Wie die Literaturübersicht zeigt, lag der Schwerpunkt bisher auf der Nutzung von Flexibilitätsoptionen auf der Stromseite. Die Wärreflexibilität in der Industrie oder in den Energieverbunden Industrie und Stadt sind noch nicht ausreichend berücksichtigt. Im Zusammenhang mit Fernwärmenetzen wird der Flexibilitätsbedarf gut erkannt und die Nutzung von Speichern oder der Zusammenschluss mehrerer Fernwärmenetze als Möglichkeit genannt. Bisher wurden Verschiebungen von industriellen Lasten nur im Zusammenhang mit dem Strombezug und den damit verbundenen Einsparungen bei den Strombezugskosten betrachtet. Eine vergleichende Analyse aller Flexibilitätsoptionen im Wärmesystem ist noch nicht erfolgt. Dieses Paper schließt die Lücke, indem es die drei Ansätze (Lastverschiebung, Städteverbund und Wärmespeicher) analysiert, um industrielle Abwärme effektiv in den Energieverbund Industrie-Stadt zu integrieren. Das wird anhand einer Fallstudie evaluiert.

3 Methodik

Die Bewertung der Flexibilitätsoptionen basiert auf dem von [10] entwickelten Modells für den Energieverbund Industrie-Stadt. Die Methodik des "Standardmodells" wird hier um Flexibilitätsoptionen erweitert, um eine bessere Nutzung der Abwärme und einen höheren Synergieeffekt zwischen Industrie und Stadt zu erreichen. Die Flexibilitätsoptionen werden anhand eines Fallbeispiels mit Hilfe von Indikatoren bewertet und mit dem Referenzszenario verglichen. Im Referenzszenario wird die industrielle Abwärme ohne den Einsatz von Flexibilitätsoptionen zur Versorgung der Stadt verwendet.

3.1 Modellerweiterung: Speicher

Der Simulationsprozess beginnt mit der Frage nach der Verfügbarkeit von industrieller Abwärme. Liegt kein Angebot an industrieller Abwärme vor, wird der Speicherinhalt überprüft und, wenn möglich, die gespeicherte Wärme zur Versorgung der Stadt genutzt. Die maximale Entladeleistung darf nicht überschritten werden. Ist der Bedarf der Stadt kleiner als die Entladeleistung, kann dieser Betrag zur Deckung des Bedarfs verwendet werden. Ist der Speicher nicht oder nur unzureichend gefüllt oder überschreitet der Bedarf die maximale Entladeleistung, muss der Restbedarf durch andere Wärmequellen gedeckt werden.

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die Stadt einen Wärmebedarf hat. Liegt kein Wärmebedarf vor, wird industrielle Abwärme gespeichert, wobei die maximale Ladekapazität nicht überschritten werden darf. Ist das Angebot der Industrie größer als die Ladekapazität, kann der Höchstbetrag gespeichert werden. Ist der Speicher ganz oder teilweise gefüllt oder überschreitet das Angebot die maximale Ladekapazität, muss der Überschuss an die Umwelt abgegeben werden.

Ist der Wärmebedarf der Stadt größer als das Angebot der Industrie, kann industrielle Abwärme zur Versorgung der Stadt genutzt werden und wird von der Stadt zu diesem Zeitpunkt vollständig aufgenommen. Der Restbedarf kann entweder durch gespeicherte Wärme, falls ausreichend, oder durch andere Quellen gedeckt werden. Ist das Potenzial industrieller Abwärme größer, wird nur ein Teil des Angebots für die Versorgung der Stadt genutzt. Die überschüssige Wärme wird entweder gespeichert oder an die Umwelt abgegeben.

Das Komponentenmodell ist durch das Speichervolumen, die Entlade- und Beladepazität sowie die Wärmeverluste über die Zeit charakterisiert. Das Speichervolumen wird durch Optimierung bestimmt. Ziel ist es, den größtmöglichen Barwert zu finden. Der Barwert wird für eine Laufzeit von 20 Jahren ermittelt.

3.2 Modellerweiterung: Städteverbund

Ein Städteverbund zeichnet sich durch die Kopplung von zwei oder mehr Städten aus. Die Kopplung wird über Fernwärmenetze geschaffen. Liegt ein geringer Wärmebedarf in einer Stadt vor kann die Wärme zur Versorgung der anderen Stadt verwendet werden. In der Praxis erfordert die Bildung von Städteverbunden die geografische Nähe und das Vorhandensein geeigneter Infrastruktureinrichtungen, z. B. eine Transportleitung, die das Fernwärmenetz der Stadt 1 mit dem Fernwärmenetz der Stadt 2 verbindet. Steht die erforderliche Infrastruktur nicht zur Verfügung, muss sie aufgebaut werden, was zu höheren Kosten führt.

Der Simulationsprozess beginnt mit der Frage nach der Verfügbarkeit von industrieller Abwärme. Wenn kein Angebot an industrieller Abwärme vorliegt, müssen andere Energiequellen erschlossen werden, um den Wärmebedarf der Stadt zu decken.

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die Stadt einen Wärmebedarf hat. Liegt kein Wärmebedarf vor, wird geprüft, ob in Stadt 2 ein Wärmebedarf besteht. Wenn in beiden Städten kein Wärmebedarf besteht, bleibt das Angebot an industrieller Abwärme ungenutzt und wird an die Umwelt abgegeben.

Ist der Wärmebedarf der Stadt größer als das Angebot der Industrie, kann industrielle Abwärme zur Versorgung der Stadt genutzt werden und wird von der Stadt zu diesem Zeitpunkt vollständig aufgenommen. Ist das Potenzial der Industrie größer, wird nur ein Teil dieses Angebots für die Stadt genutzt. Der Überschuss wird für die Versorgung der zweiten Stadt verwendet. Der restliche Bedarf der Stadt muss durch andere Energiequellen gedeckt werden. Steht nach der Versorgung der beiden Städte noch industrielle Abwärme zur Verfügung, wird diese an die Umgebung abgegeben.

3.3 Modellerweiterung: Lastverschiebung

Lastverschiebung beschreibt hier die zeitliche Verschiebung des industriellen Produktionsprozesses. Dies führt auch zu einer zeitlichen Verschiebung des Auftretens von industrieller Abwärme. Die Lastverschiebung reduziert die Produktionsleistung nicht. Die einzelnen industriellen Produktionsprozesse der Industrie werden so verschoben, dass die Abwärmekurven besser mit der Wärmebedarfskurve der Stadt übereinstimmen. Dadurch kann das Synergiepotenzial zwischen Industrie und Stadt maximiert werden. Das erhöht den Deckungsgrad und reduziert den Bedarf an zusätzlichen Energieträgern.

Diese Schritte müssen in Abstimmung mit den Industrieunternehmen durchgeführt werden, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Das dient einerseits dazu, um die Zusammenhänge (Abhängigkeiten) der einzelnen Abwärmekurven im Unternehmen zu

identifizieren und andererseits um die Größenordnung der Lastverschiebung (Stundenanzahl) zu quantifizieren.

Die Optimierung bestimmt die Anzahl der Stunden, die benötigt werden, um die Fläche zwischen der Bedarfs- und Angebotskurve zu minimieren. Einerseits gibt es ein Überangebot an industrieller Abwärme und andererseits ein Unterangebot. Um den Bereich zu minimieren, wird die Versorgungskurve nach rechts verschoben, was einen späteren Start des Produktionsprozesses bedeutet. Die maximal zulässige Zeit für die Lastverschiebung orientiert sich an Vorgaben des Industrieunternehmens. Wenn ein Unternehmen mehrere Abwärmepotenziale hat, können diese aufgrund von prozessübergreifenden Abhängigkeiten nicht unabhängig voneinander verschoben werden. Diese Abhängigkeiten können auch entsprechend dargestellt werden. Durch variable Bedingungen können die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Angebotskurven dargestellt werden.

4 Ergebnisse

Die dargestellten Ansätze zur energetischen Kopplung von Industrie und Stadt werden in einer Fallstudie evaluiert. Folgende Szenarien werden simuliert:

- Referenzszenario: Hier wird die Abwärmenutzung ohne den Einsatz von Flexibilitätsoptionen für Stadt 1 simuliert und bewertet.
- Szenario Speicher: Industrielle Abwärme wird genutzt, um die Stadt 1 mit Wärme zu versorgen. Darüber hinaus wird ein thermischer Speicher in die Simulation integriert.
- Szenario Städteverbund: Industrielle Abwärme wird zur Wärmeversorgung der Stadt genutzt. In Zeiten geringen Bedarfs wird die vorhandene industrielle Abwärme an Stadt 2 geliefert.
- Szenario Lastverschiebung: Die industriellen Prozesse und damit auch die industrielle Abwärme werden verschoben, um eine bessere Deckung mit der Wärmebedarfskurve der Stadt 1 zu erzielen.

Für eine standardisierte Darstellung der Ergebnisse (siehe Abbildung 1) wird die betrachtete Kennzahl durch den größten Indikatorwert der betrachteten Gruppe dividiert. Dabei stellt 1 das erreichbare Optimum dar. Für Barwert (NPV) und Deckungsgrad (DG) bedeutet dies den höchstmöglichen Wert und für die CO₂ Emissionen den niedrigstmöglichen Wert. Der Versorgungsgrad wird nicht dargestellt, da er für alle Szenarien gleich ist. Die detaillierten Werte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Derzeit werden durch die Wärmeversorgung der Stadt 21.501 t Kohlendioxid freigesetzt. Diese werden hauptsächlich durch die Nutzung von Erdgas verursacht.

Industrielle Abwärme kann 57% des jährlichen Wärmebedarfs der Stadt decken. Allerdings können nur etwa 44% davon für die eigentliche Wärmeversorgung genutzt werden, da die zeitliche Verfügbarkeit von industrieller Abwärme und Wärmebedarf der Stadt nicht übereinstimmen. Folglich werden nur 77% des vorhandenen Potenzials industrieller Abwärme genutzt. Insbesondere in den Sommermonaten ist die Stadt mit industrieller Abwärme überdeckt. Die Nutzung von industrieller Abwärme führt im Referenzszenario zu einer CO₂-

Einsparung von fast 40% im Vergleich zur Ausgangssituation. Die wirtschaftliche Betrachtung ergibt einen Amortisationszeitraum von 6 Jahren.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse der Szenarien (mit und ohne Flexibilitätsoptionen)

	Versorgungsgrad [%]	Deckungsgrad [%]	CO ₂ Emissionen [t]	Barwert [M€]
Keine Abwärme	-	-	21,501	-
Referenz		44	12,944	21
Speicher		46	12,888	23
Städteverbund	57	57	10,071	26
Lastver- schiebung		45	12,921	3

Durch den Einsatz von Flexibilitätsoptionen erhöht sich der Deckungsgrad um bis zu 15-30% gegenüber dem Basisszenario (44%). Im Städteverbund-Szenario ist es sogar möglich, 100% der Abwärme zu nutzen. Hier wird ein Deckungsgrad von 57% erreicht. An zweiter Stelle steht das Speicherszenario (46%), gefolgt von der Lastverschiebung (45%). Die Flexibilitätsoptionen führen zu einer besseren Ausnutzung der industriellen Abwärme mit Ausnutzungsgraden von 78-100% statt 77%.

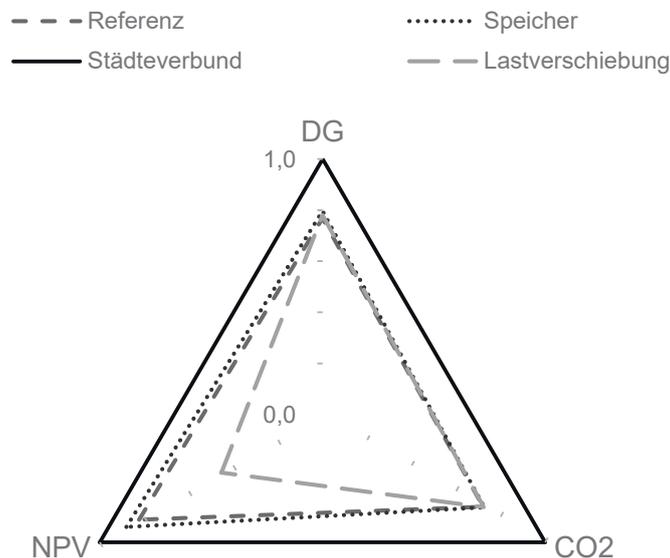


Abbildung 1: Darstellung der Simulationsergebnisse für das Referenzszenario und den Einsatz der Flexibilitätsoptionen.

Durch die Nutzung von Abwärme wird der CO₂-Ausstoß auf 12.944 Tonnen reduziert (Referenzszenario). Durch die Integration von Flexibilitätsoptionen wird der CO₂-Ausstoß weiter reduziert. Je nach Szenario sind CO₂-Emissionseinsparungen von bis zu 22%

gegenüber dem Referenzszenario möglich. Im Städteverbund-Szenario kann das Potenzial an industrieller Abwärme am besten genutzt werden, was auch zu den größten Einsparungen an CO₂-Emissionen führt.

Die Bildung eines Städteverbunds erzielt den höchsten Barwert mit 26 Mio. €. Die Lastverschiebung in der Industrie verursacht hohe Kosten, so dass sich die leichte Verbesserung des Deckungsgrades nicht lohnt und somit das unwirtschaftlichste Szenario darstellt. Hier kann ein Barwert von nur 3 Mio. € erreicht werden. Die Nutzung von Wärmespeichern führt zu höheren Gewinnen in kleinem Umfang im Vergleich zum Referenzszenario. Insgesamt sind Barwerte von 3 bis 26 Mio. Euro zu erwarten.

5 Diskussion und Ausblick

Der Einsatz von Flexibilitätsoptionen ermöglicht eine bessere Ausnutzung der industriellen Abwärme. Generell sind Flexibilitätsoptionen nur dann sinnvoll, wenn ein vorübergehendes Überangebot an industrieller Abwärme besteht. Eine kontinuierliche Unterversorgung lässt weder die Beladung eines Speichers noch die Übertragung von Wärme in eine andere Stadt zu. Bei einem dauerhaften Überangebot kann zwar ein Wärmespeicher befüllt werden, die Stadt steht jedoch nicht als Senke zur Verfügung. Die Bildung eines Städteverbunds ist ein geeignetes Mittel, um die überschüssige industrielle Abwärme zu nutzen. Dies erfordert die Nähe zu einer Stadt. Lastverschiebung in der Industrie ist wirtschaftlich nicht attraktiv.

Durch den Einsatz von Flexibilitätsoptionen erhöht sich der Deckungsgrad in unterschiedlichem Maße. Ihr Einsatz reduziert den Bedarf an zusätzlichen Brennstoffen und ermöglicht eine bessere Ausnutzung des Potenzials an industrieller Abwärme. Die Möglichkeit, mehr Wärme zu verkaufen, macht die Nutzung von Flexibilitätsoptionen tendenziell wirtschaftlicher. Der Einsatz von Flexibilitätsoptionen verbessert den Deckungsgrad, die eingesparten CO₂-Emissionen und den Barwert. Über alle Indikatoren betrachtet, stellt das Szenario "Stadtverbund" die beste Option dar und führt zu einer enormen Verbesserung des Deckungsgrades, der eingesparten CO₂-Emissionen und des Gewinns.

Es hat sich gezeigt, dass die Nutzung von industrieller Abwärme technisch und wirtschaftlich machbar ist und zu reduzierten CO₂-Emissionen führt. Die Verfügbarkeit eines Fernwärmenetzes wirkt sich besonders günstig auf die Kosten aus. Daher sollte industrielle Abwärme in jedem Fall zur Wärmeversorgung der Stadt genutzt werden. Wenn es einen Überschuss an industrieller Abwärme gibt, ist es ratsam, einen Städteverbund zu bilden, wenn eine andere Stadt in der Nähe ist. Ansonsten ist die Integration von Wärmespeichern eine geeignete Option.

6 Literatur

- [1] International Energy Agency (IEA). Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions. Paris: OECD Publishing; 2007. doi:10.1787/9789264030404-en.
- [2] Brueckner S, Miró L, Cabeza LF, Pehnt M, Laevemann E. Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions - A categorization and literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;38:164–71. doi:10.1016/j.rser.2014.04.078.
- [3] Fang H, Xia J, Jiang Y. Key issues and solutions in a district heating system using low-grade industrial waste heat. *Energy* 2015;86:589–602. doi:10.1016/j.energy.2015.04.052.
- [4] McKenna RC, Norman JB. Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. *Energy Policy* 2010;38:5878–91. doi:10.1016/j.enpol.2010.05.042.
- [5] Miró L, Brueckner S, McKenna R, Cabeza LF. Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain. *Appl Energy* 2016;169:866–73. doi:10.1016/j.apenergy.2016.02.089.
- [6] Cooper SJG, Hammond GP, Norman JB. Potential for use of heat rejected from industry in district heating networks, Gb perspective. *J Energy Inst* 2016;89:57–69. doi:10.1016/j.joei.2015.01.010.
- [7] Hammond GP, Norman JB. Heat recovery opportunities in UK industry. *Appl Energy* 2014;116:387–97. doi:10.1016/j.apenergy.2013.11.008.
- [8] Ammar Y, Joyce S, Norman R, Wang Y, Roskilly AP. Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Appl Energy* 2012;89:3–20. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.003.
- [9] Dominkovic DF, Bacekovic I, Sveinbjörnsson D, Pedersen AS, Krajacic G. On the way towards smart energy supply in cities: The impact of interconnecting geographically distributed district heating grids on the energy system. *Energy* 2016. doi:10.1016/j.energy.2017.02.162.
- [10] Karner K, Theissing M, Kienberger T. Energy efficiency for industries through synergies with urban areas. *J Clean Prod* 2016;119:167–77. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.010.