

# Effizienzsteigerung in der Industrie durch Einsatz von Effizienztechnologien zur Sektorkopplung

Dipl.-Ing. Ivan BOGDANOV, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander SAUER

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA,  
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart,  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland, +49-711-9701338,  
ivan.bogdanov@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

## **Kurzfassung:**

Der vorliegende Beitrag liefert einen Einblick in ein aktuelles Forschungsfeld zur Identifizierung und Bewertung von Effizienztechnologien und deren Einsatz in der Industrie, mit dem Fokus auf (Hochtemperatur-) Wärmepumpen zur Erschließung der oberflächennahen Geothermie als Quelle bzw. Senke für Prozesswärme bzw. -kälte. Für den in dem Beitrag präsentierten Lösungsansatz zur Energieeffizienzsteigerung in der Industrie wurde ein Modell zur technischen Potenzialanalyse des Einsatzes der betrachteten Technologie im Industrieumfeld aufgestellt. Anhand dieses Bewertungsschemas wurden im Anschluss über 250 industrielle Verfahren der Fertigungstechnik sowie verfahrenstechnische Prozesse analysiert, bewertet und nach der Eignung ihrer Versorgung mittels erdgekoppelten (Hochtemperatur-) Wärmepumpen geclustert. Ausgewählte Best-Practice-Beispiele aus der Forschungslandschaft und der Industrie bzgl. Energie-Symbiosen und intelligenter Energieversorgungskonzepte zeigen mögliche Einsatzbereiche der betrachteten Technologie im verarbeitenden Gewerbe.

**Keywords:** Energieeffizienz, Industrie, Sektorkopplung, Wärmepumpe, Geothermie

## **1 Einleitung**

Eine der größten aktuellen Herausforderungen unserer Gesellschaft besteht in der Reduktion des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen und somit der Treibhausgasemissionen. Die deutsche Bundesregierung hat dafür durch die Aufstellung der Energiewende klare Ziele für die nächsten Jahrzehnte definiert. Unter anderem soll bis 2030 der regenerative Anteil am Strommix auf 65 % gesteigert, sowie bis 2050 der Treibhausgasausstoß um 80 bis 95 % bezogen auf 1990 reduziert werden, um dann im Jahr 2050 mindestens 60 % des Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien zu decken.

Für einen großen Anteil der negativen Umweltauswirkungen sind nicht nur die Sektoren Gebäude, Verkehr sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, sondern auch das produzierende Gewerbe verantwortlich. Letzteres verursachte 2015 in Deutschland einzig prozessbedingt ca. 61,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen [1]. Laut Studienergebnissen [2] sind ca. 28 % des deutschen Endenergieverbrauchs auf die Industrie zurückzuführen, wobei 75 % davon auf Wärme- und Kälteanwendungen entfallen [3].

Vor diesem Hintergrund müssen Unternehmen des produzierenden Gewerbes einerseits auf externe Herausforderungen und Rahmenbedingungen reagieren, wie Steigerung der Energieeffizienz, Realisierung einer Energieflexibilität, aber auch Reduktion von Treibhausgasemissionen und Integration in das urbane Umfeld. Andererseits gilt es, interne Randbedingungen einzuhalten, wie Kostenreduktion, Versorgungssicherheit, Lastmanagement (engl. Demand-Side-Management, kurz DSM) und dezentrale Energieversorgung (Abbildung 1). Konkrete Herausforderungen sind dabei ein hoher Primärenergieverbrauch sowie hohe Energiekosten für die Wärme- und Kältebereitstellung an Produktionsstätten, aber auch die fehlende Kreislaufschließung in Form von Energiekaskaden (bspw. Abwärmenutzung) oder eine effiziente Energiespeicherung (einschl. Wärme, Kälte).



Abbildung 1 Spannungsfeld zwischen internen und externen Rahmenbedingungen für Unternehmen

In diesem Spannungsfeld gilt es, holistische Konzepte als Lösung zur Realisierung der Energiewende in der Fabrik zu entwickeln. Dabei soll, um optimale Synergien zu bilden, die gesamte energetische Funktionskette betrachtet werden: von einer effizienten und nachhaltigen Energieerzeugung, über eine intelligente Energieverteilung und -speicherung, bis hin zu einer effizienten und flexiblen Rückgewinnung. Durch eine intelligente und nachhaltige energetische Kopplung von Fertigungsstätten mit ihrem urbanen Umfeld können außerdem energetische Symbiosen aufgestellt werden. Um dies zu ermöglichen, müssen u.a. Technologien zur Erschließung, aber auch Speicherung von industrieller Abwärme und erneuerbaren Wärmequellen eingesetzt werden. Konkret spielt der Einsatz von Effizienztechnologien zur Sektorkopplung – v. a. Wärmepumpen – an der Schnittstelle zwischen Gebäudeinfrastruktur und Fertigungsprozesse eine wichtige Rolle.

## 2 Energieeffizienzsteigerung in der Industrie – Stand der Technik

Die Steigerung der industriellen Energieeffizienz ist eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Energiewende. Dabei muss der Umgang mit Strom und Wärme noch effizienter und der restliche Bedarf weitestgehend mit Energie aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden. Die Grundlage dieses Handlungsbedarfs bilden in erster Linie innovative Technologien und systemische Lösungen, die marktverfügbar, jedoch noch weitestgehend wenig verbreitet sind, allerdings perspektivisch ein hohes Potenzial besitzen, wirtschaftlich zu werden und einen spürbaren Effizienzsprung im produzierenden Gewerbe zu bewirken. [4]

Vor diesem Hintergrund hat sich eine aktuelle Studie [4] das Ziel gesetzt, diese Technologien und Lösungen zu untersuchen, um die Grundlage der Weiterentwicklung der Effizienzstrategie zu schaffen. Das methodische Vorgehen umfasste dabei die Erstellung einer sogenannten Longlist mit den rund 150 wichtigsten marktverfügbaren Innovationen, die hohes Effizienzpotenzial für die Industrie aufweisen. In einem zweiten Schritt erfolgten eine Bewertung der aufgelisteten Innovationen sowie eine Einteilung in Technologiekategorien, was zu einer sogenannten Mediumlist mit ca. 75 Technologien führte. Im dritten Schritt des Vorgehens wurden die Innovationen mithilfe quantitativer und qualitativer Indikatoren bewertet, woraus sich eine sogenannte Shortlist mit 15 am besten bewerteten Innovationen ergab. Anschließend wurde die Shortlist dahingehend analysiert, inwieweit die Effizienzpotenziale der einzelnen Innovationen belastbar ermittelt werden können. Aufgrund der Entscheidungsfaktoren Rechercheaufwand und Skalierbarkeit der Effizienzpotenziale entstand eine endgültige Liste von zehn Innovationen, deren technisches und wirtschaftliches Potenzial dann quantitativ ermittelt wurde. Zwei Innovationen wurden dabei ebenfalls qualitativ näher betrachtet. Die Bestimmung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials der jeweiligen Innovationen erfolgte aufgrund einer Literaturrecherche sowie eines dafür entwickelten Fragebogens, den sowohl Hersteller, als auch Anwender der Technologien ausfüllen konnten. Aufgrund dieser Daten wurden Anwendungsbeispiele beschrieben, anhand deren das technische Potenzial auf Bundesebene in ausgewählten Industrie-Branchen Deutschlands hochskaliert wurde. Die Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials der jeweiligen Innovationen basierte auf der Nachbildung eines Kohortenverhaltens. Dabei wird angenommen, dass ein Anlagenbestand sukzessive durch neuere Anlagen mit einer höheren spezifischen Energieeffizienz ersetzt wird. Diese Austauschrate basiert einerseits auf die Lebensdauer der entsprechenden Anlagen, andererseits auf die nicht-wirtschaftlichen Fälle, wo eine gesonderte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der unterschiedlichen Betriebsmodi (Auslastung, Leistungsaufnahme) der Anlagen notwendig war. Abschließend wurden für die jeweiligen untersuchten Innovationen ebenfalls die Hemmnisse, die bei der Erschließung ihrer technischen und wirtschaftlichen Potenziale auftreten, strukturiert abgeleitet.

## **2.1 Technologien zur Energieeffizienzsteigerung in der Industrie**

Die Untersuchungen im Rahmen einer aktuellen Studie [4] ergaben eine Liste von zehn innovativen, marktverfügbaren Technologien und systemischen Lösungen mit hohem Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz, die aber in der Industrie noch nicht breit eingesetzt werden. Diese wurden nach ihrem technischen und wirtschaftlichen Potenzial strukturiert bewertet (vgl. Kap. 2) und dabei ergab sich entsprechend ihres wirtschaftlichen Potenzials folgende absteigende Rangfolge:

1. Hochtemperaturwärmepumpe (HTW)
2. Optimierungssoftware für Energieverbundsysteme (OfE)
3. Intelligente Antriebslösungen (IA)
4. Automatische Absperrung von Stand-By Druckluftnetzen (AASBD)
5. Wasser als Kältemittel (WaK)
6. Magnetische Kühlung (MK)
7. Mikrowellentechnologie (MWT)

8. Intelligente Gleichstromnetze (IG)
9. Wabenförmige keramische Wärmetauscher (WkW)
10. Energieeffiziente Schaltschrankkühlung (ESK)

Die Einsparungen, die bei der Abschätzung des technischen Potenzials betrachtet wurden, sind diejenigen, die sich ergeben, wenn die jeweilige Innovation überall dort eingesetzt wird, wo es technisch möglich ist. Die Hochrechnung des technischen Potenzials auf Ebene der Bundesrepublik Deutschland wurde aufgrund der jeweiligen Datenlage für jede Technologie entweder anhand von konkreten Anwendungsfällen oder mithilfe von Literaturwerten durchgeführt. Das Einsparpotenzial der Hochtemperatur-Wärmepumpe bezieht sich auf den gesamten Wärmebedarf der Industrie in Deutschland. Die anderen Technologien wurden jeweils für die sogenannte Top-Branche, d.h. denjenigen Wirtschaftszweig abgeschätzt, in dem die Technologie die höchsten Effizienzpotenziale erreichen kann. [4]

Die Abbildung 2 zeigt im Ergebnis die hochgerechneten Endenergieverbräuche jeweils mit und ohne Einsatz der Technologie in der entsprechenden Top-Branche in Deutschland. Bei der Annahme einer Anwendung überall dort, wo es technisch möglich ist, sind je nach Technologie wesentlich höhere technische Potenziale zu erwarten. [4]

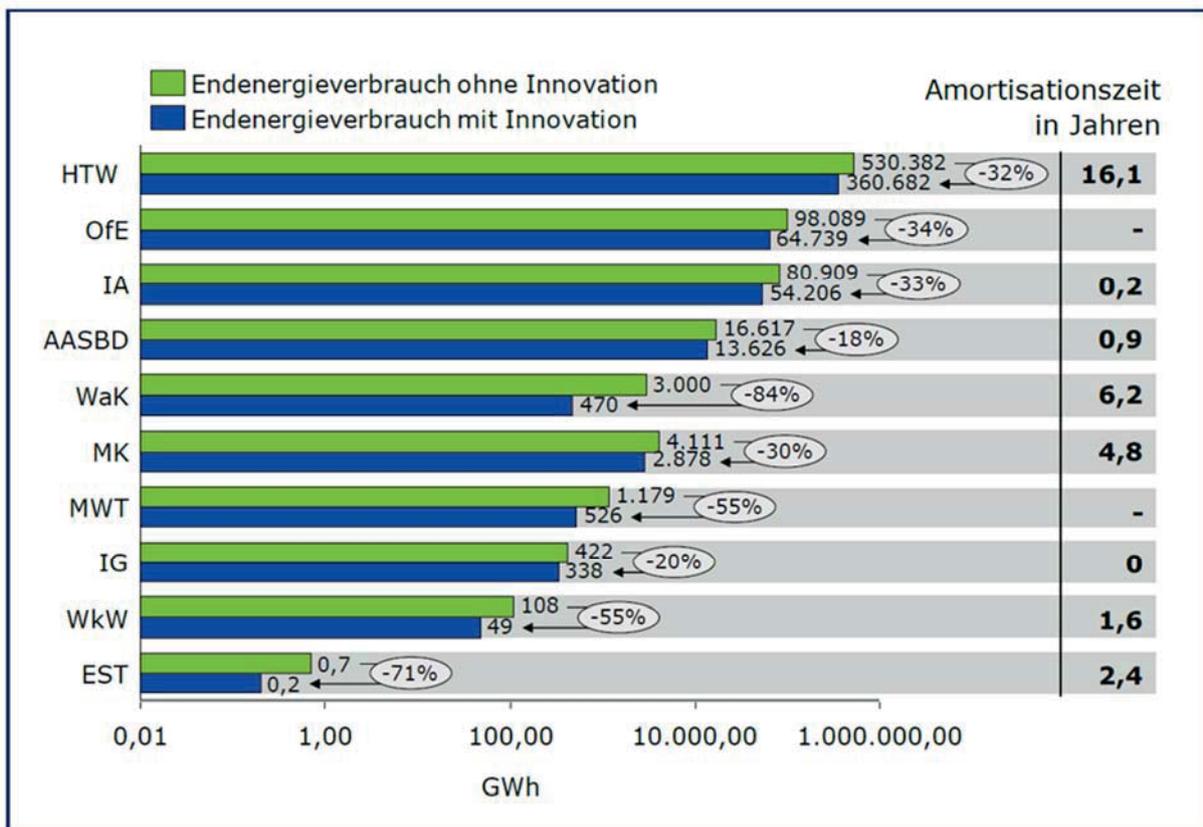


Abbildung 2 Endenergieverbrauch mit und ohne Innovationen, hochgerechnet auf Deutschland-Ebene [4]

Die Einsparungen, die bei der Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials betrachtet wurden, sind diejenigen, die sich ergeben, wenn in den nächsten zehn Jahren bei allen relevanten Ersatz-, Erweiterungs- und Neuinvestitionen die jeweilige Innovation eingesetzt wird, sobald diese wirtschaftlich ist. Innovationen mit einer (betriebswirtschaftlich ermittelten) Amortisationszeit von unter drei Jahren wurden als wirtschaftlich betrachtet. Im Fall einer

Amortisationszeit von weniger als drei Jahren sind das technische und das wirtschaftliche Potenzial identisch. Im Fall von längeren Amortisationszeiten verringert sich das wirtschaftliche Potenzial gegenüber dem technischen Potenzial. Die Amortisationsrechnung beinhaltet die Investitions- und die Energiekosten über zehn Jahre. [4]

Die Abbildung 3 zeigt einen Vergleich jeweils zwischen dem wirtschaftlichen und dem technischen Potenzial der einzelnen Innovationen. Der Prozentsatz rechts im Bild gibt an, welcher Anteil des technischen Potenzials nach heutigem Stand bereits wirtschaftlich ist. Bei dem Einsatz der Technologie OfE sind je nach Anwendungsfall stark variierende Amortisationszeiten und wirtschaftliche Potenziale zu erwarten, deswegen wurde dafür kein wirtschaftliches Potenzial ausgewiesen. Die Amortisationszeiten der Technologien HTW, WaK und MK liegen über drei Jahre, was zu einer wesentlichen Differenz jeweils zwischen dem technischen und dem wirtschaftlichen Potenzial in diesen Fällen führt. Vor allem bei der Hochtemperatur-Wärmepumpe ist zu erwarten, dass aufgrund der Amortisationszeit von über 16 Jahren nur ca. 8,5 TWh des gesamten technischen Potenzials von 169,7 TWh umgesetzt werden. [4]

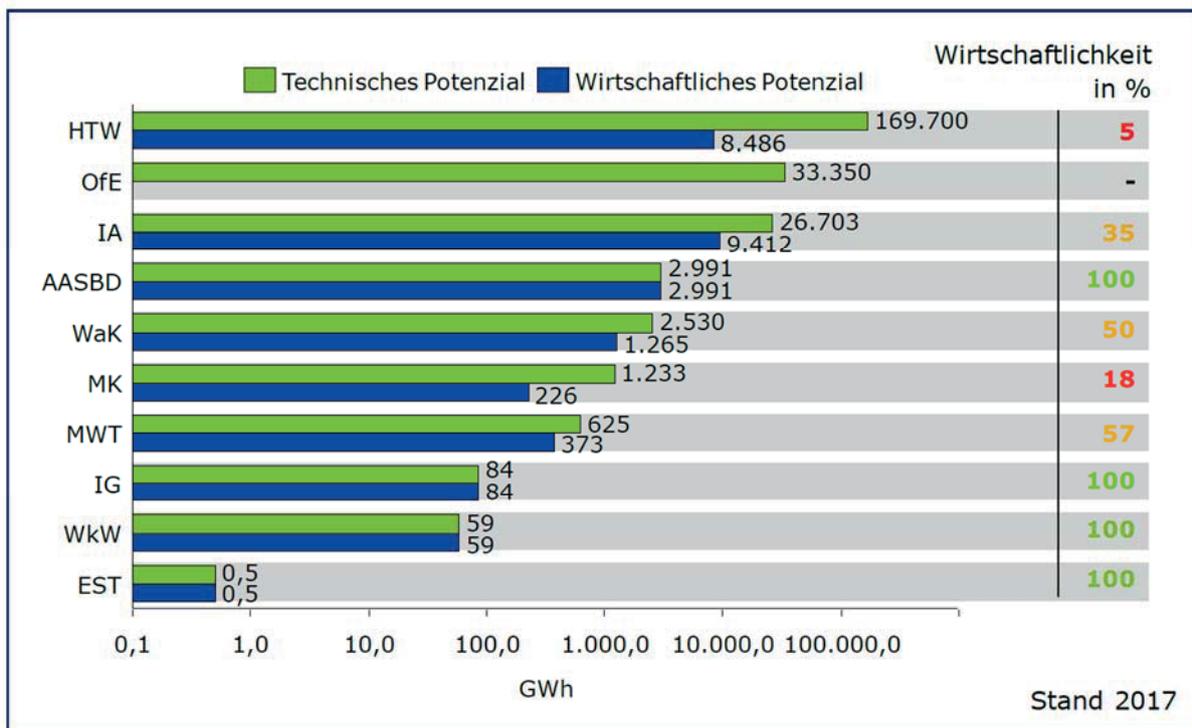


Abbildung 3 Technisches und wirtschaftliches Potenzial, hochgerechnet auf Deutschland-Ebene [4]

## 2.2 Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen in der Industrie – eine energieeffiziente, nachhaltige Lösung

Eine Technologie, die sowohl zur Erschließung von erneuerbaren Wärmequellen, als auch zur Nutzung von Abwärme, aber auch zur Wärme- und Kältespeicherung hocheffizient eingesetzt werden kann, ist die Wärmepumpe. Im industriellen Kontext ist es entsprechend die Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTW), eine Weiterentwicklung der Wärmepumpe, die einerseits hohe Temperaturen bei der Wärmeveredelung erzielt und andererseits hohe Wärmequellentemperaturen nutzen kann. Diese Technologie kann neben der Wärmeerzeugung aber gleichzeitig auch einen Beitrag zur Deckung des Kältebedarfs leisten.

Hochtemperatur-Wärmepumpen können mittels spezieller Verdichter-Technik, mehrstufigen Kreisprozessen und unter Einsatz speziell entwickelter Kältemittel Heiz- und Wassertemperaturen von bis zu 140 °C im Vorlauf erzeugen [5]. Zu den verschiedenen Kältemitteln bzw. Kältemittelgemischen, die dabei zum Einsatz kommen, gehören bspw. ECO3, HFO-1336mzz-Z, LG6 oder R744 (CO<sub>2</sub>) [6]. Das dampfförmige Kältemittel wird dabei mittels eines Verdichters von einem niedrigen auf ein höheres Temperatur- und Druckniveau gebracht. In der Regel wird dazu elektrische Energie als Antrieb genutzt. Etablierte Komponenten in der Wärmepumpentechnik sind Hubkolben-, Schrauben-, Scroll- und Turboverdichter. Ein wirtschaftlicher und effizienter Betrieb von Wärmepumpen im industriellen Umfeld setzt das Vorhandensein einer geeigneten Wärmequelle voraus. Ist diese Voraussetzung erfüllt, erreicht eine Hochtemperatur-Wärmepumpe oft einen COP (engl. coefficient of performance) von drei und mehr [4].

Die energieeffiziente HTW steht allerdings im direkten Wettbewerb mit konventionellen Technologien basierend auf Verbrennungstechnik (z. B. Gasfeuerung) und stellt somit in der Industrie oft nur eine Ergänzungsmaßnahme zu diesen Technologien dar [4]. Dadurch kann jedoch trotzdem der Brennstoffbedarf vermindert und somit ein Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie geleistet werden. Insbesondere in der Lebensmittel-, Papier-, Chemie-, Pharma-, Kunststoff-, oder metallverarbeitenden Industrie kann diese Technologie effizient eingesetzt werden. Besonders in den ersten drei genannten Branchen liegen große Potenziale für HTW-Anwendungen jenseits eines Wärmebedarfs von 80 °C [4]. In Abhängigkeit von der jeweiligen Industriebranche, der bestehenden Infrastruktur sowie der Verfügbarkeit geeigneter Wärmequellen und Wärmesenken im Betrieb liegen die relativen Energieeinsparungen allerdings in einem breiten Spektrum. Beispielsweise würde laut Wolf et al. [6] der Einsatz einer HTW bei einem Fertighaushersteller durch Nutzung der Abwärme des Betriebskraftwerks den Wärmebedarf der Holz Trocknungsanlage um 73 % reduzieren. Dieselbe Studie [6] weist ein deutschlandweites technisches Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen in der Industrie von 121,4 TWh aus. Betrachtet man dabei eine Temperaturobergrenze von 140 °C [5], steigt das genannte technische Potenzial auf knapp 170 TWh [4]. Die Randbedingungen des wirtschaftlichen Potenzials der industriellen Umsetzbarkeit von HTW sind durch das Vorhandensein von geeigneten Wärmequellen sowie durch geforderte Amortisationszeiten von zwei bis fünf Jahren gegeben. Letztere können aufgrund hoher Anlageninvestitionskosten nur sehr schwer erreicht werden und somit sinkt entsprechend deutlich das wirtschaftliche Potenzial von HTW (vgl. Abbildung 3).

### **3 Lösungsansatz zur Energieeffizienzsteigerung in der Industrie durch Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen**

Ein besonderer Einsatzbereich von Hochtemperatur-Wärmepumpen ist die Nutzung des natürlichen Umfelds, des Erdreichs, zur effizienten Erschließung von Umweltwärme und -kälte, aber auch zur saisonalen Speicherung von thermischer Energie im Untergrund. Die mit dem Einsatz von Wärmepumpen zur Erschließung von oberflächennaher Geothermie (< 400 m Tiefe) verbundene Wärmeveredelung stellt im Bereich der Gebäudeklimatisierung und Warmwasseraufbereitung den Stand der Technik der letzten Jahre dar. Im industriellen Kontext wird dieser Einsatzbereich aktuell jedoch kaum betrachtet.

Vor diesem Hintergrund wird ein Lösungsansatz vorgestellt, der durch den Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen zu einer Energieeffizienzsteigerung in der Industrie führt. Durch Prozesswärme- und -kältebereitstellung sowie -speicherung soll es dem verarbeitenden Gewerbe möglich sein, mittels dieser Effizienztechnologie von einer der umweltfreundlichsten und gleichzeitig aus menschlicher Perspektive unerschöpflichen und praktisch ubiquitären Wärmequelle effizient und wirtschaftlich zu profitieren. Mittelfristig soll der Ansatz die Grundlagen für ein Konzept zur nachhaltig kostenstabilen und CO<sub>2</sub>-freien Versorgung von Prozesswärme und -kälte in bestimmten industriellen Anwendungsbereichen schaffen.

### 3.1 Modell zur technischen Potenzialanalyse des Einsatzes von erdgekoppelten Wärmepumpen im Industrieumfeld

In einem ersten Schritt in Richtung der Aufstellung dieses Lösungsansatzes wird das Ziel verfolgt, aus der Vielzahl der Verfahren der Fertigungstechnik diejenigen zu identifizieren, deren Wärme- bzw. Kältebedarf sich durch den Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen technologisch bzw. wirtschaftlich (größtenteils) decken lassen.

Dafür wurde zunächst ein Modell zur technischen Potenzialanalyse des Einsatzes dieser Technologie im Industrieumfeld aufgestellt. Grundlage für das Modell sind ein Kriterienkatalog sowie eine Gewichtungsskala, anhand deren sich die Einsatzfähigkeit der oberflächennahen Geothermie als Wärmequelle für bestimmte industrielle Prozesse qualitativ bewerten lässt (vgl. Tabelle 1).

Kriterium	Gewichtung
Bodengegebenheiten	3
Technische Eignung der Technologie	3
Produktqualität und Einhaltung vorgegebener Prozessparameter	1
Beeinflussung der Produktionsplanung	1
Anteil des Wärme- bzw. Kältebedarfs an dem Gesamtenergiebedarf	2
Investitions-, Instandhaltungs- und Betriebskosten	3
Umweltauswirkungen der Wärme- und Kältebereitstellung	2
Versorgungssicherheit	2
Gesamt	17

*Tabelle 1 Kriterienkatalog und Gewichtungsskala als Grundlage des Modells [7]*

Die Gewichtung der jeweiligen Kriterien basiert auf eine dreistufige Skala, wobei der größte Gewichtungsfaktor den Zwangsbedingungen zugeordnet wurde. Nicht zwangsläufige Faktoren, welchen aber eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird, werden mit dem Faktor 2 gewichtet. Eine Gewichtung mit dem Faktor 1 erfolgt für Kriterien, die sekundären Aspekten bzgl. des Einsatzes dieses Energieversorgungssystems entsprechen. Die vorgeschlagenen Zwangsbedingungen sind Bodengegebenheiten, die technische Eignung der Technologie sowie der Aspekt der Kosten für die Umsetzung. Die Vorschläge für die Gewichtungsfaktoren 2 bzgl. Umweltauswirkungen und Versorgungssicherheit sollen allgemein für den Standort Deutschland gültig sein. Die niedrig eingeschätzte Wechselwirkung zwischen dem hier



Aufbringen von Korrosionsschutzmittel (Unterbodenschutz)	Hauptgruppe 5	90 °C – 110 °C
Gummierung	Hauptgruppe 5	120 °C – 130 °C
Tempern	Hauptgruppe 6 Untergruppe 6.2	110 °C – 120 °C
Beizen	Holzverarbeitung	50 °C – 80 °C
Kochen	Chemieindustrie	100 °C – 110 °C
Kunststoffherstellung (LDPE, HDPE sowie PVC)	Kunststoffindustrie	80 °C – 100 °C
Kunststoffverarbeitung (LDPE)	Kunststoffindustrie	120 °C – 140 °C
Trocknen	Keramikherstellung	20 °C – 120 °C
Bleichen	Textilindustrie	60 °C – 100 °C
Pad-Roll-Verfahren	Textilindustrie	40 °C – 60 °C
Entschlichten- und Powertex-Verfahren	Textilindustrie	40 °C – 60 °C
Waschen und Trocknen	Textilindustrie	30 °C – 100 °C

*Tabelle 2 Fertigungsverfahren mit bester Eignung für den Einsatz des betrachteten thermischen Versorgungskonzeptes (Auszug) – in Anlehnung an [7]*

Als Untermauerung der Ergebnisse dieser Analyse zeigen Naegler et al. [9], dass ca. 25 % des Endenergieverbrauchs der europäischen Industrie der Erzeugung von Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser mit Temperaturen unter 100 °C zuzuordnen sind.

### 3.2 Best-Practice-Beispiele aus Forschung und Wirtschaft

Zur Aufstellung von nachhaltigen Konzepten zur Wärme- und Kälteversorgung in der Industrie mittels erdgekoppelten (Hochtemperatur-) Wärmepumpen gibt es sowohl in der Forschungslandschaft als auch in der Praxis bereits Lösungsansätze, die allerdings nicht direkt auf die Prozessenergie fokussiert sind.

Beispielsweise hatte das EU-geförderte Projekt “Integration of Geothermal Energy into Industrial Applications – IGEIA” (Dezember 2006 – Mai 2009) als Ziel die Unterstützung der Entwicklung der geothermischen Wärme- und Kälteversorgung an industriellen Standorten. In einer praktischen Fallstudie im Rahmen des Projektes wurde die Abwärmenutzung einer Gießerei in Schweden behandelt, wobei ca. 3.600 MWh Wärme pro Jahr zurückgewonnen und in das Fernwärmenetz der anliegenden Stadt eingespeist werden. [10] [11]

Ein Beispiel aus industriellem Umfeld ist die Hochtemperatur-Wärmepumpe bei Plansee Hochleistungswerkstoffe Österreich. Diese entnimmt Abwärme mit 45 °C aus den Produktionsprozessen und speist 85 °C in das firmeneigene Fernwärmenetz ein. Dadurch kommt das Unternehmen seinem 2013 gesteckten Ziel, 20 % weniger Energie pro Kilogramm Produkt zu benötigen, einen großen Schritt näher. [12]

Ein weiteres Anwendungsbeispiel zeigt, wie in der Automobilindustrie Produktionsanlagen (Schweißzangen) mittels 3.300 Energiepfählen gekühlt werden. Die Errichtung des zu seiner

Zeit (2013) weltweit größten oberflächennahen Geothermiefeldes und des damit verbundenen nachhaltigen Energiesystems mit einer Leistung von 2 MW führten zur Entscheidung gegen den Bau eines Kühlturms und damit zu weiteren Ressourceneinsparungen, wie 25.000 m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr. [13] [14]

Weitere Praxis-Beispiele aus Deutschland u.a. zur Prozesskälteversorgung in der Elektronik-Industrie, zur Wärme- und Kälteversorgung in der Automobilzulieferer-Industrie (größtenteils für Gebäude) sowie bzgl. eines komplexen Systems zur Wärme- sowie zur aktiven und passiven Kälteversorgung (ebenfalls meist für Gebäude) sind detailliert in Mands et al. [11] beschrieben.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag liefert einen Einblick in ein aktuelles Forschungsfeld zur Identifizierung und Bewertung von Effizienztechnologien und deren Einsatz in der Industrie, mit dem Fokus auf (Hochtemperatur-) Wärmepumpen zur Erschließung der oberflächennahen Geothermie als Quelle bzw. Senke für Prozesswärme bzw. -kälte.

Die Grundlage zur Steigerung der industriellen Energieeffizienz sowie der Deckung des Energiebedarfs weitestgehend mit Energie aus erneuerbaren Quellen bilden hauptsächlich innovative Technologien und systemische Lösungen, die marktverfügbar, jedoch noch weitestgehend wenig verbreitet sind, allerdings ein hohes technisches Potenzial besitzen.

Laut aktuellen Studienergebnissen [4] ist eine vielversprechende Effizienztechnologie die (Hochtemperatur-) Wärmepumpe. Aufgrund ihres deutschlandweiten technischen Energieeinsparpotenzials in der Industrie von über 120 TWh präsentiert der vorliegende Beitrag einen Lösungsansatz zur Energieeffizienzsteigerung in der Industrie mittels erdgekoppelten Wärmepumpen zur Prozesswärmebereitstellung. Dafür wurde ein Modell zur technischen Potenzialanalyse des Einsatzes dieser Technologie im Industrieumfeld aufgestellt. Anhand dieses Bewertungsschemas wurden im Anschluss über 250 industrielle Verfahren der Fertigungstechnik sowie verfahrenstechnische Prozesse analysiert, bewertet und nach der Eignung ihrer Versorgung mittels erdgekoppelten Wärmepumpen gruppiert.

Ausgewählte Best-Practice-Beispiele aus der Forschungslandschaft und der Industrie bzgl. Energie-Symbiosen und intelligenter Energieversorgungskonzepte zeigen mögliche Einsatzbereiche der betrachteten Technologie im verarbeitenden Gewerbe.

Vorausschauend bilden die hier gezeigten Konzepte die Grundlage zur Steigerung der jährlichen Gesamteffizienz von Energiesystemen in der Industrie. Weitere Vorteile des Konzeptes liegen auch in den verschiedenen Anwendungsbereichen (Erschließung von erneuerbaren Energiequellen sowie Abwärmenutzung), aber auch in der Möglichkeit zur effizienten Kombination mit prinzipiell konkurrierenden Technologien basierend auf fossilen Energieträgern (bspw. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) oder auch mit Wärmespeichern.

Übergeordnetes Ziel des hier gezeigten Lösungsansatzes wird es sein, nachhaltige, kostenstabile und CO<sub>2</sub>-arme Konzepte zur Versorgung der teilweise energieautarken Fabriken der Zukunft im Kontext der urbanen Produktion zu entwickeln. Dabei muss fallspezifisch untersucht werden, ob dadurch eine Unabhängigkeit von den volatilen Energiemärkten oder im Gegenteil, entsprechend dem Ansatz der Energieflexibilität eine Kooperation mit diesen Märkten in Zukunft angestrebt werden soll.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Umweltbundesamt, Hrsg. (2015):** Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015 [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am 10.1.2018], verfügbar unter: [www.umweltbundesamt.de/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-26\\_climate-change\\_13-2017\\_nir-2017\\_unfccc\\_de.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-26_climate-change_13-2017_nir-2017_unfccc_de.pdf)
- [2] **Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2017):** Energieflussbild 2016 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule (PJ) [online]. AGEB [abgerufen am 31.1.2018], verfügbar unter: [ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ageb\\_energieflussbild-kurz\\_de-2016-pj\\_20170803.pdf](http://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_energieflussbild-kurz_de-2016-pj_20170803.pdf)
- [3] **Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2013):** Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011 [online]. AGEB [abgerufen am 31.1.2018], verfügbar unter: [ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ageb\\_endbericht\\_anwendungsbilanzen\\_2010\\_2011.pdf](http://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_endbericht_anwendungsbilanzen_2010_2011.pdf)
- [4] **Kube, M. et al. (2017):** Marktverfügbare Innovationen mit hoher Relevanz für die Energieeffizienz in der Industrie [online]. Ecofys, adelphi, Universität Stuttgart, Prognos [abgerufen am 10.1.2018], verfügbar unter: [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/marktverfuegbare-innovationen-mit-hoher-relevanz-fuer-energieeffizienz-in-der-industrie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/marktverfuegbare-innovationen-mit-hoher-relevanz-fuer-energieeffizienz-in-der-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=14)
- [5] **Bobelin, D., Bourig, A. (2012):** Experimental Results of a Newly Developed Very High Temperature Industrial Heat Pump (140°C) Equipped With Scroll Compressors and Working With a New Blend Refrigerant. In: International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Paper 1299 [online]. Purdue University [abgerufen am 10.1.2018], verfügbar unter: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1299>
- [6] **Wolf, S., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A., Jakobs, R. (2014):** Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland – Forschungsbericht [online]. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) [abgerufen am 10.1.2018], verfügbar unter: [www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/veroeffentlichungen/forschungsberichte/downloads/141216\\_Abschlussbericht\\_FKZ\\_0327514A.pdf](http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/veroeffentlichungen/forschungsberichte/downloads/141216_Abschlussbericht_FKZ_0327514A.pdf)
- [7] **Behnken, P. (2016):** Einordnung industrieller Fertigungsverfahren bezüglich des Wärme- und Kältebedarfs in Hinsicht auf die energietechnische Potentialanalyse der Wärme- und Kältebereitstellung durch regenerative Energiequellen. Studienarbeit – Band 833, Universität Stuttgart.
- [8] **DIN 8580:2003-09:** DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Fertigungsverfahren – Begriffe, Einleitung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [9] **Naegler, T., Simon, S., Klein, M., Gils, H. C. (2015):** Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. In: International Journal of Energy Research; 39:2019-2030 [online]. DLR [abgerufen am 31.1.2018], verfügbar unter: [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.3436/epdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.3436/epdf)
- [10] **European Commission (2008):** IGEIA – Integration of Geothermal Energy into Industrial Applications; Deliverable 8 – Report on technical, environmental and economic system of actual energy use under defined conditions; for three industrial sites [online]. Saunier & Associés, SWECO, UBeG GbR [abgerufen am 28.1.2018], verfügbar unter: [ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/igeia\\_actual\\_energy\\_use\\_for\\_3\\_industrial\\_sites\\_d8.pdf](http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/igeia_actual_energy_use_for_3_industrial_sites_d8.pdf)
- [11] **Mands, E., Sauer, M., Grundmann, E., Sanner, B. (2016):** Shallow geothermal energy use in industry in Germany. In: European Geothermal Congress 2016 Strasbourg, 19.-24. September 2016.
- [12] **Meyer, J.-P. (2017):** Hochtemperatur-Wärmepumpe spart Erdgas [online]. Ochsner Wärmepumpen GmbH [abgerufen am 29.1.2018], verfügbar unter: [sonnewindwaerme.de/waermepumpe/hochtemperatur-waermepumpe-spart-erdgas](http://sonnewindwaerme.de/waermepumpe/hochtemperatur-waermepumpe-spart-erdgas)
- [13] **Volkswagen Aktiengesellschaft (2013):** Unsere blaue Fabrik am Meer [online]. Volkswagen AG [abgerufen am 30.1.2018], verfügbar unter: [autogramm.volkswagen.de/10\\_13/standorte/standorte\\_02.html](http://autogramm.volkswagen.de/10_13/standorte/standorte_02.html)
- [14] **Bundesverband Geothermie e.V. (2012):** VW-Werk in Emden wird „grün“ durch Geothermie [online]. Bundesverband Geothermie [abgerufen am 30.1.2018], verfügbar unter: [www.geothermie.de/news-anzeigen/2012/02/08/vw-werk-in-emden-wird-grun-durch-geothermie.html](http://www.geothermie.de/news-anzeigen/2012/02/08/vw-werk-in-emden-wird-grun-durch-geothermie.html)