

Industrielle Abwärme zur Stromerzeugung: Potenziale und Forschungsbedarf



IZES
Patrick Hoffmann
hoffmann@izes.de

Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

Sascha Heib
heib@izes.de

Der Endenergieverbrauch zur Wärmebereitstellung der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistung lag in Deutschland im Jahre 2016 bei rund 490 Terrawattstunden [AG Energiebilanzen 2016]. Davon fallen verschiedenen Studien zufolge zwischen 130 und 226 Terrawattstunden als Abwärme an [Connolly et al. (2013); Pehnt et al. (2010); Persson et al. (2014); IZES (2015)], welche zurzeit ungenutzt in Abgasen, Abluft oder Abwässern der Umwelt zugeführt werden. Die Erschließung dieser ungenutzten Potenziale ist erklärtes Ziel der Klimaschutzbemühungen der Bundesregierung und wird entsprechend umfangreich gefördert [vgl. z.B. BMWi (2017a) und (2017b)].

Zur Nutzung von Abwärme stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf Technologien zur Erzeugung elektrischer Energie aus Abwärme. Im Weiteren wird ausdrücklich nicht der Frage nachgegangen, ob und unter welchen Voraussetzungen die Verstromung von Abwärme einer thermischen Verwendung vorgezogen werden soll. Vielmehr soll der Stand der Technik sowie der aktuelle Forschungsbedarf beleuchtet werden.

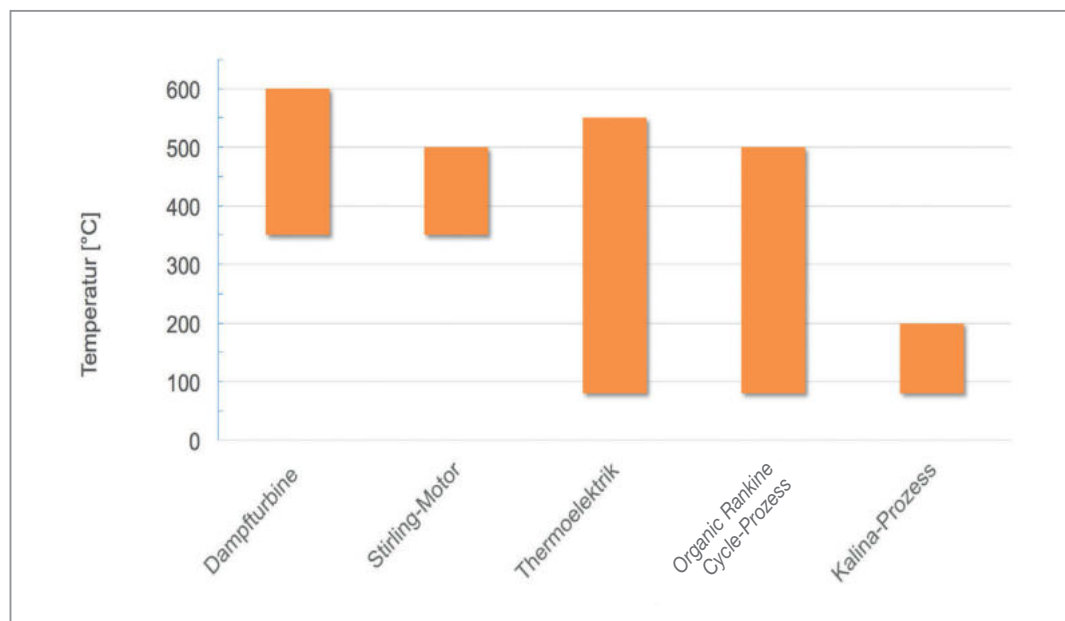
► **Abbildung 1** zeigt die aktuell verfügbaren Technologien zur Erzeugung von elektrischer Energie aus industrieller Abwärme sowie die Temperaturbereiche, in denen diese technisch eingesetzt werden können.

Der Wirkungsgrad der einzelnen Technologien ist vom Temperaturniveau des Abwärmemediums abhängig und steigt in der Regel mit zunehmender Temperatur und analog steigendem Exergieanteil des Abwärmeträgers.

Doch liegen gerade in niedrigeren Temperaturbereichen große Potenziale brach. So sind nach [Brückner (2016)] von einem deutschen Gesamtpotenzial an gasförmiger Abwärme, dass sich zwischen 60 und 70 Terrawattstunden bewegt, annähernd 70% einem Temperaturbereich unter 200 °C zuzuordnen. ► **Abbildung 1** verdeutlicht, dass aktuell nur die Technologien Organic-Rankine-Cycle, Thermoelektrik sowie der Kalina-Prozess zur Verstromung in einem Temperaturbereich bis knapp unter 100 °C zur Verfügung stehen.

Im Vergleich der drei genannten Verstromungstechnologien für niedrige Temperaturbereiche ist der Kalina-Prozess nur in einem relativ kleinen Temperaturbereich einsetzbar. Außerdem ist das verwendete Ammoniak toxisch und korrosiv, weshalb die Komponenten einer Kalina-Anlage aus besonders hochwertigem Material bestehen müssen (z.B. hochlegierte Stähle oder Titan). Hinzu kommt ein erhöhter Aufwand für Betrieb und Wartung der Anlagen, der sich aus dem Umgang mit dem toxischen Arbeitsmedium ergibt, welches nicht entweichen darf. Aus den genannten Gründen ist die Kalina-Technologie

Abbildung 1
**Verfügbare
Technologien zur
Abwärmeverstromung
mit ihren jeweiligen
Temperatureinsatz-
bereichen**
(IZES 2016/2017)



fast vollständig aus der Forschungslandschaft verschwunden. Der Fokus der Betrachtungen liegt im Folgenden auf den thermoelektrischen Generatoren und dem Organic Rankine Cycle-Prozess.

Funktionsweise

- Thermoelektrische Generatoren**

Unter dem Überbegriff Thermoelektrik werden Vorgänge zusammengefasst, bei denen Wärme mit Hilfe von Halbleitern direkt und ohne bewegliche Teile in elektrische Energie umgewandelt wird.

Die physikalische Grundlage hierfür ist der sogenannte Seebeck-Effekt. Dieser besagt, dass wenn zwei unterschiedlich elektrisch leitende Materialien zu einem Stromkreis verbunden sind und sich beide Kontaktstellen auf einem unterschiedlichen Temperaturniveau befinden, zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung entsteht.

Die technische Umsetzung dieses Vorgangs geschieht in sogenannten thermoelektrischen Generatoren (TEG). Sie bestehen typischerweise aus zwei Wärmeübertragern zur Erzeugung einer heißen und einer kalten Seite sowie den dazwischenliegenden thermoelektrischen Modulen. Diese wandeln die sie durchfließende Wärme teilweise in elektrische Energie um. Je nach eingesetztem Material können TEG in unterschiedlichen Temperaturbereichen eingesetzt werden.

- Organic Rankine Cycle-Prozess**

Der Organic Rankine Cycle-Prozess (ORC) ist ein thermodynamischer Kreisprozess, ähnlich dem Clausius Rankine Cycle-Prozess (CRC), wie er in konventionellen Wasserdampfkraftwerken angewandt wird. Im Unterschied dazu werden ORC-Anlagen jedoch nicht mit Wasserdampf, sondern mit einem organischen Arbeitsfluid angetrieben. Meist erwärmt eine Wärmequelle einen Thermoölkreislauf, welcher dann die Wärme mittels eines Wärmetauschers an das Arbeitsfluid abgibt. Das Fluid verdampft und treibt eine Turbine, einen Schraubenverdichter oder eine Hubkolbenmaschine an. Durch die Wahl des organischen Arbeitsfluids, beispielsweise Silikonöle, Kohlenwasserstoffe (Butan, Hexene, Pentan, Ethanol etc.) oder konventionelle Kältemittel, kann die Betriebstemperatur so weit heruntersetzt werden, dass die Verstromung von Abwärme bereits ab 85 °C möglich ist.

Aktueller Stand der Technologie

- Thermoelektrische Generatoren (TEG)**

TEG können einem breiten Spektrum innerhalb des Technology Readiness Level (TRL) zugeordnet wer-

den, der je nach Anwendungsfall zwischen 2 und 9 liegt. Sie werden aktuell bspw. in der Raumfahrt, als Sensoren in Messstationen, in Herzschrittmachern oder auch in Campinganwendungen eingesetzt. Zur Verstromung von Abwärme im industriellen Maßstab kommen TEG zurzeit ausschließlich in Forschungsprojekten zum Einsatz.

Die nachfolgende **► Tabelle 1** zeigt, in welchen Temperaturbereichen die aktuell verfügbaren thermoelektrischen Materialien eingesetzt werden und welche Wirkungsgrade diese erreichen können.

Tabelle 1

Thermoelektrische Materialien:
Temperatureinsatzbereiche und Wirkungsgrade
[Fraunhofer IPM (2016)]

	Material	Einsatzbereich	Wirkungsgrad
gute kommerzielle Verfügbarkeit	Bismut-Telluride (BiTe)	100 °C bis 250 °C	4 %
	Blei-Telluride	200 °C bis 500 °C	7 %
geringe kommerzielle Verfügbarkeit (Auswahl)	Skutterudite	250 °C bis 500 °C	8 %
	Halb-Heusler-Legierungen	250 °C bis 500 °C	5 %
	Silizide	300 °C bis 650 °C	5 %

► **Tabelle 1** verdeutlicht, dass Bismut-Telluride bereits bei Temperaturen knapp über 100°C eingesetzt werden können, der Wirkungsgrad dieses Materials aber sehr gering ist. Kommerzielle, segmentierte Module, bei denen Bismut- und Bleitellurid (BiTe, PbTe) miteinander kombiniert werden, erreichen Wirkungsgrade von bis zu 7% (bei einer Einsatzhöchsttemperatur von etwa 540°C). Aufgrund der Giftigkeit von Blei und Bismut wird jedoch nach Alternativen in der Materialauswahl geforscht. Ein großes Potenzial bieten in dieser Hinsicht insbesondere die Materialklasse der Skutterudite (abgeleitet von Mineral Skutterudit, CoAs₃), Halb-Heusler-Legierungen, Silizide sowie modifizierte BiTe-Module mit erweiterter Temperaturstabilität. Entsprechende Generatoren befinden sich aktuell noch im Forschungs-, Prototyp- und Einzelanfertigungsstadium. Im Laborversuch konnten kaskadierte Module mit einer Kombination von Nieder- und Hochtemperaturmaterialien Wirkungsgrade von bis zu 20% erreichen. Skutterudite sind auch bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen effizient.

Maßgeblich zur Bewertung eines Materials zur thermoelektrischen Nutzung ist der ZT-Wert (Thermoelektrische Gütezahl), welcher die Effizienz eines Materials angibt. Derzeit liegt dieser Wert bei kommerziellen Generatoren bei 1, Demonstrationsanlagen können Werte von bis zu 2,4 erreichen. Für eine wirtschaftliche, kommerzielle und breite Anwendung (auch in Haushalten) werden Materialien mit einem ZT-Wert ab 3 vorausgesetzt [Fraunhofer IPM (2016)].

Aktuelle Forschungsgebiete sind die Verstromung von Abwärme aus Verbrennungsabgasen von Automobilen, Schiffen, BHKW sowie von Strahlungsabwärme in der Industrie (z. B. bei Schmiedeprozessen), die Entwicklung keramischer Materialien sowie die Erweiterung des Temperaturbereichs von 200 °C bis 1.000 °C [IZES (2017)].

Geforscht wird derzeit u. a. auch an geeigneten Löttechniken zur Verbindung der elektrischen Kontakte, welche den erforderlichen hohen Temperaturunterschieden standhalten, langlebig sind und gleichzeitig einen niedrigen elektrischen Widerstand haben [Fraunhofer IPM (2016)].

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellen nanostrukturierte Materialien dar (z. B. nanokristallines Silizium). Von diesen verspricht man sich einerseits den Ersatz giftiger und teurer Materialien wie Blei und Tellur, andererseits höhere Wirkungsgrade.

- **Organic Rankine Cycle-Prozess (ORC)**

Unter den hier betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme ist der Organic Rankine Cycle-Prozess die am weitesten entwickelte. ORC-Anlagen können einem Technology Readiness Level von 6 bis 9 zugeordnet werden. Sie können mit Wirkungsgraden zwischen 10% und 18% elektrische Leistungen von 5 kW bis 15 MW liefern und arbeiten in Temperaturbereichen zwischen 85 °C und 530 °C. Höhere Temperaturbereiche können zwar ebenfalls durch ORC-Anlagen erschlossen werden, allerdings kommt hier in der Regel der konventionelle Wasserdampfkreislaufprozess zum Einsatz, der sich wiederum für niedrigere Temperaturniveaus nicht eignet [IZES (2017)].

ORC-Anlagen werden derzeit überwiegend zur Verstromung von geothermischer Energie, in Biomassekraftwerken bzw. KWK-Anlagen sowie bei solarthermischen Kraftwerken eingesetzt. Zur Abwärmenutzung wurden bisher in Deutschland rund 180 ORC-Anlagen in einem Leistungsbereich von 5 kW bis 7.500 kW vor allem für Temperaturen zwischen 80 °C und 300 °C installiert [ORC-Fachverband (2017)]. ORC-Anlagen in unteren Leistungsbereichen gelten allgemein derzeit noch als unwirtschaftlich. In den Industriezweigen der Metallverarbeitung, der Glasherstellung und in der Landwirtschaft befinden sich ORC-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 20 kW und 60 kW im Probetrieb.

Die allgemeine Forschung konzentriert sich weitestgehend auf die Entwicklung neuer Wärmeübertrager, Arbeitsmittel und Expander [IZES (2016)].

Systemkompatibilität und Risiken

Die Systemkompatibilität der Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme ist unter derzeitigen Bedingungen ohne Anpassungsbedarf gegeben. Risiken für die Technologien ergeben sich insbesondere hinsichtlich der vorhandenen industriellen Abwärmequellen. Bei der Planung zum Einsatz von Technologien zur Abwärmeverstromung ist insbesondere darauf zu achten, dass die langfristige Verfügbarkeit der Abwärmeströme bei gleichbleibendem Temperaturniveau beachtet wird. Externe Faktoren, wie beispielsweise identifizierte Verbesserungspotenziale bezüglich der Effizienz der Abwärmequelle, kurz- oder mittelfristig geplante Prozess- und/oder Produktwechsel sowie ggf. vorhandene Pläne zur Standortverlagerung/-schließung der Produktionsstätte müssen ebenfalls ausreichend beachtet werden.

F&E-Empfehlungen

Im Rahmen des unter Mitarbeit des IZES durchgeführten Forschungsvorhabens „Technologien für die Energiewende“ (FKZ 03ET4036A-C), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wurden künftige Forschungsfragen für Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung auf Grundlage einer multikriteriellen Analyse abgeleitet. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachfolgend genannt [IZES (2017)]:

- **Thermoelektrische Generatoren**

Eine der größten Herausforderungen bei TEG ist die Entwicklung von geeigneten Materialien (Substituierung des toxischen/rohstoffkritischen Bleis/Tellurs, Materialien für verschiedene Temperaturbereiche). Vor allem für den niedrigen und mittleren Temperaturbereich (wo die meiste Abwärme anfällt) sind Alternativen zu Bismuttelluriden zu entwickeln. Im mittleren Temperaturbereich stellen Skutterudite, Halb-Heusler-Module und Silizide eine gute Alternative zu Bleitellurid dar. Diese Materialien müssen jedoch weiter erforscht und verbessert werden (Eigenschaften, Preis, Güteeffizienzen). Auf den Erfolgen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der Verwendung von nanokristallinem Silizium kann für die weitere Erforschung dieser Materialklasse aufgebaut werden.

Zusätzlich sollte die Installation von Demonstrationsanlagen sowohl für niedrige als auch für höhere Leistungsklassen unterstützt werden, um die Funktionstüchtigkeit und Rentabilität der Thermoelektrik in diesen Bereichen unter Beweis zu stellen.

Um TEG auch finanziell attraktiv zu gestalten, müssen diese automatisiert hergestellt werden können, was die Entwicklung von geeigneten Herstellungsverfahren erfordert.

Ein grundsätzliches Problem stellt derzeit noch die elektrische Kontaktierung dar. Hier sind vor allem Langlebigkeit, die Resistenz gegenüber hohen Temperaturunterschieden und ein niedriger elektrischer Widerstand von Bedeutung.

- **Organic Rankine Cycle-Prozess**

Speziell für ORC-Anlagen im kleineren Leistungsbereich (unter 200 kW) und im höheren Leistungsbereich (ab 2.500 kW) ist zur Preissenkung der Anlagen eine serielle Herstellung erforderlich.

Ebenfalls von Bedeutung ist diesbezüglich die Entwicklung effizienter Wärmetauscher, da diese maßgeblich den Wirkungsgrad und die Investitionskosten beeinflussen. Dabei sind vor allem preisgünstige Materialien zu untersuchen, welche den Verschmutzungen von zum Teil korrosiven Abgasen standhalten. Außerdem gilt es in Zukunft geeignete Arbeitsfluide für verschiedene Temperaturbereiche zu entwickeln und zu identifizieren, insbesondere um mittel- und langfristig halogenierte Arbeitsfluide durch weniger klimaschädliche Verbindungen zu ersetzen.

Weiterhin sollten zur Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung neue ORC-Verfahrenskonzepte (z. B. ohne zwischengeschaltete Thermoölkreisläufe) untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2016): unter <http://www.ag-energiebilanzen.de>, abgerufen am 25.11.2016
- BMWi (2017a): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Änderung der Richtlinie für die Förderung der Abwärmevermeidung und Abwärmennutzung in gewerblichen Unternehmen. Berlin 2017
- BMWi (2017b): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0. Berlin 2017
- Brückner (2016): Brückner, S.: Industrielle Abwärme in Deutschland. Dissertation an der TU München. München 2016
- Connolly et al. (2013): Connolly, D. et al.: Heat Roadmap Europe 2050. Second Pre-Study for the EU28. 2013.
- Fraunhofer IPM (2016): Technologiebewertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potentiale und Forschungsbedarf“ im Auftrag des BMWi 2016 (noch unveröffentlicht)
- IZES (2015): Studie Abwärmennutzung – Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Kurzstudie im Auftrag des BMUB. Saarbrücken 2015
- IZES (2016): Technologiebewertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potentiale und Forschungsbedarf“ im Auftrag des BMWi 2016 (noch unveröffentlicht)
- IZES (2017): Technologiebericht TF 6.3 Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme innerhalb des Forschungsprojekts TF Energiewende. Saarbrücken 2017.
- ORC-Fachverband (2017): unter http://www.orc-fachverband.de/was_ist_die_orc_technologie_.html, abgerufen am 25.10.2017
- Pehnt et al. (2010): Pehnt, M. et al.: Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potentiale und energiepolitische Umsetzung. Forschungsbericht. Karlsruhe 2010.
- Persson et al. (2014): Persson, U. & Möller, B. & Werner, S.: „Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions,“ Energy Policy, Elsevier, vol. 74(C), pages 663-681.