

## Vorwort des Herausgebers

Der Organic Rankine Cycle (ORC) hat sich in den vergangenen Jahren auf dem Markt für Energieanlagen etabliert, um elektrische Energie („Strom“) aus thermischer Energie („Wärme“) zu gewinnen, wenn diese bei so niedrigen Temperaturen vorliegt, dass der konventionelle Clausius-Rankine-Prozess mit Wasser nicht effizient ist. Zu den wichtigsten Anwendungsfeldern zählen die Nutzung von Geothermie und industrieller Abwärme. Je nach Temperaturbereich werden unterschiedliche organische Stoffe als Arbeitsfluid verwendet, wobei die Auswahl nicht nur von thermodynamischen, sondern auch von ökonomischen, ökologischen und weiteren Kriterien bestimmt wird.

Ein Aspekt, der bei der Auslegung von ORC-Anlagen bisher noch zu wenig beachtet wurde, besteht in der Auswirkung eines hinsichtlich Menge und Temperatur schwankenden Wärmeangebots, wie es insbesondere bei industrieller Abwärme typisch ist. Die resultierenden Fluktuationen im ORC-Kreislauf wirken sich auf den Wirkungsgrad der Turbine aus, der sich bei Teillast-Betrieb gegenüber dem Volllast-Auslegungspunkt erheblich verschlechtern kann.

Eine Idee, diesem Effekt entgegenzuwirken, besteht im Einsatz einer Turbine mit einer Geometrie, die eine sogenannte adaptive Schluckfähigkeit erlaubt. Dieser Frage ist der Autor wissenschaftlich nachgegangen. Im vorliegenden Band stellt er seine Vorgehensweise und Forschungsergebnisse vor.

Ermöglicht wurde das Projekt durch Mittel der Bayerischen Forschungstiftung (BFS). Besonders wesentlich war hier die enge und sich ergänzende Zusammenarbeit zwischen dem von Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß geleiteten Fachgebiet Thermische Maschinen und Strömungsmaschinen der OTH Amberg-Weiden und meinem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) am Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth.

Bayreuth, im Oktober 2023

Professor Dr.-Ing. Dieter Brüggemann

## Vorwort des Autors

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung der OTH Amberg-Weiden sowie am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse der Universität Bayreuth. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich im Laufe der Zeit unterstützt haben und zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Zunächst danke ich meinem universitären Betreuer Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann für die Möglichkeit seit meiner Masterarbeit intensiv auf dem Gebiet des Organic Rankine Cycles zu forschen. Meinem hochschulseitigen Betreuer Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß gilt ein besonderer Dank für zahlreiche fruchtbare Diskussionen zu turbinenspezifischen Fragestellungen und für motivierende Worte zur richtigen Zeit. Für die wissenschaftliche Begutachtung meiner Arbeit danke ich der gesamten Prüfungskommission.

Die Dissertation wurde im Rahmen einer kooperativen Promotion unter dem Dach des BayWISS-Verbundkollegs Energie verfasst. Dem Verbundkolleg danke ich für die finanzielle Unterstützung und die vielen Möglichkeiten zur Vernetzung.

Maßgebliche Anteile dieser Arbeit wurden im Rahmen des Projektes „*TurboSmart* – adaptive Mikroexpansionsturbine für die Energierückgewinnung“ erarbeitet. Hier gilt mein Dank der Bayerischen Forschungsförderung als Fördergeber und der DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO. KG als Industriepartner und Hersteller des Turbinenprototypen. Darüber hinaus möchte ich dem gesamten Projektteam für die hervorragende Zusammenarbeit auf Augenhöhe danken.

Meinem Gruppenleiter am Lehrstuhl Dr.-Ing. Florian Heberle danke ich für die fachlichen Diskussionen, die entscheidend zur Steigerung der Qualität der Arbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt auch Markus Görl und Michael Hickethier für die Hilfe bei der Erweiterung der ORC-Versuchsanlage und die Unterstützung bei messtechnischen Belangen. Ich danke meinen Bürokollegen Philipp Streit und Sebastian Kutzner insbesondere für das gute Arbeitsklima und für neue Denkanstöße. Jan Mišák danke ich für die Unterstützung bei der Unsicherheitsbetrachtung des Turbinenwirkungsgrads in Form seiner Masterarbeit.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich für den Rückhalt während meines gesamten Bildungswegs von der Schulzeit bis hin zu dieser Arbeit. Der größte Dank gebührt meiner Partnerin Melanie. Ihre Unterstützung und ihr Verständnis haben maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

## Kurzfassung

Bei der Verstromung von industrieller Abwärme mittels ORC-Anlagen stellen die prozessbedingten Fluktuationen der Wärmequelle eine Herausforderung für den Wärmerückgewinnungsprozess dar. So führt bei ORC-Anlagen, die Turbinen als Expansionsmaschine nutzen, insbesondere eine deutliche Abnahme des reversiblen Kreisprozesswirkungsgrades in Teillastbetriebspunkten zu einem starken Abfallen des ORC-Wirkungsgrades. Um der Verringerung des Kreisprozesswirkungsgrades in Teillast entgegenzuwirken, wird in der vorliegenden Arbeit eine Turbinengeometrie mit adaptiver Schluckfähigkeit entwickelt und deren Einfluss auf die Wärmerückgewinnung einer ORC-Anlage im Off-Design-Betrieb analysiert.

Die experimentelle Charakterisierung der entwickelten adaptiven Quasi-Impuls-Cantileverturbine mit konvergent-divergentem Düsenring erfolgt in einem ORC-Versuchskraftwerk. Hierbei stellt sich die Anpassung der Düsenhöhe durch eine bewegliche Seitenwand als effektive Möglichkeit zur Änderung der Schluckfähigkeit der Turbine heraus. Aufgrund der variablen Schluckfähigkeit kann der Turbineneintrittsdruck in Teillast deutlich gesteigert werden. Jedoch zeigt sich, dass mit der Verstellung der Düsenhöhe eine deutliche Abnahme des isentropen Turbinenwirkungsgrades in Teillast einhergeht. Vorteilhaft bei einer idealen Verstellung der Düsenhöhe ist hingegen eine nahezu konstante Drehzahllage des Optimums des Turbinenwirkungsgrades.

Durch ein semi-empirisches Simulationsmodell wird der Einfluss der adaptiven Turbinengeometrie auf Prozessebene untersucht. Für abnehmende eingekoppelte Wärmeleistung kann mit der verstellbaren Turbinengeometrie eine deutliche Steigerung des reversiblen Kreisprozesswirkungsgrades erreicht werden. Trotz signifikant geringerer Turbinenwirkungsgrade kann bei idealer Verstellung der Düsenhöhe der ORC-Wirkungsgrad im niedrigsten Teillastbetriebspunkt um 8,5 % gesteigert werden. Bei Wärmeabfuhr über einen Trockenkühler hat die Umgebungstemperatur einen starken Einfluss auf den Turbinenausstrittsdruck. Daher sind die Vorteile der adaptiven Turbinengeometrie für sinkende Umgebungstemperaturen aufgrund gesteigerter Druckverhältnisse wesentlich geringer ausgeprägt. Industrielle Abwärmequellen zeigen Fluktuationen bei den Abgastemperaturen und -massenströmen. Für einen variierenden Abgasmassenstrom wird hierbei ein höheres Potenzial zur Steigerung des Teillastwirkungsgrades durch den Einsatz von adaptiven Turbinen beobachtet. Hinsichtlich potenziell geeigneter Abwärmeprofile wird geschlussfolgert, dass eine vorteilhafte Energieausbeute durch eine adaptive Turbinengeometrie nur dann erreicht wird, wenn über einen hohen zeitlichen Anteil des Profils hinweg vergleichsweise niedrige Lasten auftreten. Als Richtwert wird hier ein Lastanteil von 50 % der Volllast während 50 % des Betrachtungszeitraums angegeben.

## Abstract

In the conversion of industrial waste heat to electricity by means of ORC plants, the process-related fluctuations of the heat source represent a challenge for the heat recovery process. In ORC plants using turbines as an expansion machine, a significant decrease in reversible cycle efficiency at part-load operating points in particular leads to a clear drop in ORC efficiency. To counteract the reduction of the cycle efficiency at part load, a turbine geometry with adaptive swallowing capacity is developed in the present work and its influence on the heat recovery of an ORC system in off-design operation is analyzed. The experimental characterization of the developed adaptive quasi-impulse cantilever turbine with convergent-divergent nozzle ring is performed in an ORC test rig. Here, the adjustment of the nozzle height by a movable side wall turns out to be an effective way to change the swallowing capacity of the turbine. Due to the variable swallowing capacity, the turbine inlet pressure can be significantly increased at part load. However, it is found that adjusting the nozzle height is accompanied by a significant decrease in isentropic turbine efficiency at part load. The advantage of an ideal adjustment of the nozzle height, on the other hand, is an almost constant rotational speed position of the optimum turbine efficiency.

A semi-empirical simulation model is used to investigate the influence of the adaptive turbine geometry at the process level. For decreasing transmitted thermal power, a significant increase of the reversible cycle efficiency can be achieved with the adjustable turbine geometry. Despite significantly lower turbine efficiencies, the ORC efficiency at the lowest part load operating point can be increased by 8.5 % with ideal adjustment of the nozzle height. When heat is dumped via a dry cooler, the ambient temperature has a strong influence on the turbine outlet pressure. Therefore, the advantages of adaptive turbine geometry for decreasing ambient temperatures are much less pronounced due to increased pressure ratios. Industrial waste heat sources show fluctuations in exhaust gas temperatures and mass flow rates. For a varying exhaust gas mass flow rate, a higher potential for increasing the part load efficiency by using adaptive turbines is observed. With regard to potentially suitable waste heat profiles, it is concluded that a beneficial energy yield is only achieved by an adaptive turbine geometry if comparatively low loads occur over a high temporal proportion of the profile. As a guideline value, a load share of 50 % of the full load during 50 % of the observation period is specified here.

## 1 Einleitung

Der steigende Energiebedarf, die Endlichkeit der fossilen Ressourcen sowie die stetig strikter werdenden Grenzwerte für Abgasschadstoffe und Treibhausgase treiben die Suche nach Verbesserungspotenzialen bei der Energieeffizienz von bestehenden Industrieanlagen voran [1]. Der Energieverbrauch der Industrie macht annähernd 40 % des globalen Gesamtverbrauchs aus und wird noch immer vorwiegend durch fossile Brennstoffe gedeckt [2]. Daher kann die industrielle Abwärmenutzung, vor dem Hintergrund des vom Europäischen Rat verabschiedeten Europäischen Klima- und Energierahmens 2030, einen wichtigen Beitrag zur Erreichung des Energieeffizienzziels leisten [3]. Bei der Wandlung von Abwärme zu Strom kommen beispielsweise der Clausius Rankine Cycle, der Kalina Cycle und der Organic Rankine Cycle (ORC) als Technologieoptionen in Frage [4]. Dabei ist der ORC eine zuverlässige Technologie, um die Wärme von niedrigem bis mittlerem Temperaturniveau zu verstromen und wird daher als vielversprechende Lösung zur Abwärmenutzung angesehen [5]. Allerdings limitiert der häufig fluktuierende Charakter der industriellen Abwärmequellen den Wirkungsgrad der Wärmenutzungsanlagen [6]. Die Fluktuationen der Wärmequellen stellen eine Herausforderung für den ORC dar, da sie bei nicht angepasster Auslegung der Anlage zu einer suboptimalen Komponentenauslegung und einem geringen Anlagenwirkungsgrad in Off-Design-Betriebspunkten führen [6]. Während in der Literatur mehrere Möglichkeiten wie thermische Energiespeicher, Bypass-Regelungen [7] oder Wasserdampfspeicher [8] untersucht werden, um eine variable Wärmezufuhr zum ORC zu vermeiden, wird in der vorliegenden Arbeit ein anderer Ansatz verfolgt. Durch den Einsatz einer Turbine mit verstellbarer Geometrie wird hier prozessseitig auf ein variables Wärmeangebot reagiert und das Teillastverhalten des ORC optimiert. Bei ORC-Anlagen mit Turbinen als Expansionsmaschine führt hierbei eine konstante Schluckfähigkeit der Turbine zu einem deutlich sinkenden oberen Prozessdruck in Teillast [9], was den reversiblen Kreisprozesswirkungsgrad negativ beeinflusst. Dennoch soll im Folgenden eine Turbine als Expansionsmaschine im ORC analysiert werden. Der Grund hierfür sind mehrere Vorteile gegenüber den volumetrischen Expandern: die Fähigkeit von Turbinen zur Verarbeitung von hohen Volumenstromverhältnissen, das theoretische Potenzial für höhere Expansionswirkungsgrade, vor allem aber die einfache Anpassbarkeit einer Turbine mit definierten Hauptabmessungen an einen breiten Bereich von Randbedingungen [10]. Durch den Einsatz einer Turbine mit variabler Geometrie und dadurch auch variabler Schluckfähigkeit soll der Abnahme des oberen Prozessdrucks in Teillast entgegengewirkt werden. Basierend auf einer adaptiven Regelung der variablen Turbinengeometrie soll hierdurch der reversible

Kreisprozesswirkungsgrad des ORC im Off-Design deutlich gesteigert werden. Hinsichtlich des Einsatzes der adaptiven Turbine in ORC-Anlagen zur industriellen Abwärmenutzung lassen sich folgende wissenschaftliche Fragestellungen ableiten:

- Kann durch die entwickelte adaptive Turbinengeometrie die Schluckfähigkeit der supersonischen Turbine gezielt beeinflusst werden?
- Wie verhält sich der isentrope Turbinenwirkungsgrad bei einer Anpassung der Turbinengeometrie an den vorliegenden Massenstrom des Arbeitsmediums?
- Beeinflussen die untersuchten adaptiven Turbinengeometrien die Drehzahlabhängigkeit des isentropen Turbinenwirkungsgrades?
- Welchen Einfluss hat eine adaptive Turbine auf den reversiblen Kreisprozesswirkungsgrad eines ORC in Teillast?
- In welchen Teillastsituationen ist der Einsatz einer adaptiven Turbine hinsichtlich des ORC-Wirkungsgrades vorteilhaft gegenüber einer starren Turbinengeometrie?
- Welchen Einfluss hat die Umgebungstemperatur auf die ORC-Anlage bei Verwendung eines Trockenkühlers zur Wärmeabfuhr?
- Für welche Abwärmepprofile ergibt sich eine vorteilhafte elektrische Energieausbeute durch den Einsatz einer adaptiven Turbinengeometrie?

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die genannten Fragestellungen beantwortet werden. Zunächst werden die hierfür notwendigen Grundlagen kompakt bereitgestellt und der Stand der Technik dargestellt. Im 3. Kapitel wird die methodische Herangehensweise erläutert. Darauffolgend werden im 4. Kapitel experimentelle Ergebnisse zur Charakterisierung der adaptiven Turbine und deren Einfluss auf die ORC-Versuchsanlage, vor allem im Off-Design, gezeigt. Die erhaltenen Ergebnisse werden in Relation zum Verhalten einer Turbine mit fixierter Geometrie gesetzt. Anschließend werden die experimentellen Charakteristiken in einem semi-empirischen Simulationsmodell genutzt, um eine Variation der Abgasbedingungen, wie sie im Experiment nicht darstellbar ist, durchzuführen. Als Teillastsituationen werden im Modell sowohl eine Variation des Abgasmassenstroms als auch eine Variation der Abgastemperatur betrachtet. Schließlich wird die resultierende Energieausbeute für zwei exemplarische fluktuierende Abwärmepprofile analysiert.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen der Arbeit erläutert und ein kurzer Überblick zum Stand der Technik gegeben. Zunächst werden die Potenziale der industriellen Abwärmenutzung, insbesondere für die deutsche Industrie, dargestellt. Der Einsatz von ORC-Anlagen zur Abwärmeverstromung wird diskutiert und die damit verbundenen Herausforderungen werden aufgezeigt. Anschließend werden die Besonderheiten und Einsatzbereiche von Turbinen in ORC-Anlagen dargelegt. Im darauffolgenden Kapitel wird die Schluckfähigkeit, als wichtige Kenngröße einer Turbine, definiert. Ein Technologieüberblick mit Konzepten für adaptive Turbinengeometrien schließt sich an. Daraufhin werden einige simulative Untersuchungen hinsichtlich des Einsatzes von adaptiven Turbinengeometrien in ORC-Anlagen aufgegriffen. Zur Einordnung der in dieser Arbeit untersuchten ORC-Anlage wird schließlich ein Überblick zu bereits existierenden experimentellen Untersuchungen der Energiewandlung in ORC-Anlagen gegeben.

### 2.1 Industrielle Abwärmeverstromung mittels ORC-Anlagen

Die Energiewandlungskette von Primärenergie zu Endenergie ist mit zahlreichen Verlusten verbunden. Insbesondere beim Endverbraucher fallen große Mengen an Abwärme an, die ungenutzt an die Umwelt abgegeben werden [11]. In Abhängigkeit des betrachteten Prozesses kann die Abwärme durch Strahlung, Kühlwasser, Abgas oder Abluft abgeführt werden [4]. Durch die Nutzung der in diesen Abwärmeströmen enthaltenen Exergie kann die Energieeffizienz der analysierten Prozesse verbessert und dadurch der Primärenergieverbrauch gesenkt werden [11]. Generell tritt Abwärme in allen Endverbrauchersektoren auf. Da im industriellen Sektor annähernd 40 % des weltweiten Energieverbrauchs anfallen und dadurch täglich 8,7 Gt CO<sub>2</sub> emittiert werden [2], wird in der Forschungsliteratur zunehmend die Abwärmenutzung in der Industrie diskutiert – so auch in der vorliegenden Arbeit. Hierbei werden zunächst einige Studien aufgegriffen, die das in der Industrie vorhandene Abwärmepotenzial untersuchen.

Forman et al. [11] betrachten das globale Abwärmepotenzial basierend auf einem Top-Down-Ansatz unter Verwendung von Energiebilanz-Faktoren für die analysierten Energieströme. Die Datenbasis für den industriellen Sektor liefern hierbei die Veröffentlichung von Cullen et al. [12] und eine Studie zur Abwärmenutzung in der US-amerikanischen Industrie [13]. Neben dem Potenzial in der Industrie werden von Forman et al. auch die Sektoren Transport, Handel und private Haushalte untersucht. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Untersuchung der Temperaturverteilung der Abwärmeströme.

Hierzu unterteilen die Autoren die Abwärmeströme in Niedertemperatur- ( $< 100\text{ °C}$ ), Mitteltemperatur- ( $100\text{ °C} - 299\text{ °C}$ ) und Hochtemperatur-Abwärme ( $\geq 300\text{ °C}$ ). Es werden das Abwärmepotenzial und Carnot-Potenzial analysiert, wobei letzteres den Exergie-Anteil der Abwärme repräsentiert. Für das Abwärmepotenzial des industriellen Sektors ergeben sich  $8.861\text{ TWh/a}$  ( $31.902\text{ PJ/a}$ ), während das entsprechende Carnot-Potenzial zu  $3.013\text{ TWh/a}$  ( $10.846\text{ PJ/a}$ ) bestimmt wird. Das mit  $1.898\text{ TWh/a}$  weitaus größte Carnot-Potenzial wird bei der Hochtemperatur-Abwärme ermittelt. Allgemein werden als Herausforderungen bei der Abwärmenutzung ungeeignete Temperaturniveaus und eine zeitliche, örtliche und mengenmäßige Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage genannt.

Persson et al. [14] identifizieren in ihrer Veröffentlichung strategische Wärmesynergie-Regionen in der Europäischen Union (EU27). Basierend auf Daten des Europäischen Schadstoffemissionsregisters hinsichtlich der  $\text{CO}_2$ -Emissionen der betrachteten industriellen Anlagen und Energieversorgungsanlagen, werden deren Primärenergieverbräuche berechnet. Darauf aufbauend wird das Abwärmepotenzial bestimmt, indem für die verschiedenen Branchen Standardwerte für die Rückgewinnungswirkungsgrade angenommen werden. Bei den Branchen Chemie und Petrochemie, Eisen und Stahl, Nichteisenmetalle, nicht-metallische Mineralien und Papier, Zellstoff und Druck wird ein Wirkungsgrad von 25 % unterstellt, während für die Lebensmittel- und Getränkeindustrie von 10 % ausgegangen wird. Für die EU resultiert ein Abwärmepotenzial des gesamten industriellen Sektors von  $2.924\text{ PJ/a}$  ( $812\text{ TWh/a}$ ). Für Deutschland wird das entsprechende Potenzial mit  $566\text{ PJ/a}$  ( $157,2\text{ TWh/a}$ ) angegeben.

Panayiotou et al. [15] ermitteln das europäische Abwärmepotenzial auf Grundlage der von Forman et al. [11] erhaltenen Ergebnisse. Die Autoren unterscheiden zwischen Abwärmepotenzial und Carnot-Potenzial (Exergieanteil der Abwärme) und unterteilen die Potenziale in die von Forman et al. definierten Temperaturbereiche. Für die EU werden ein Abwärmepotenzial von  $370\text{ TWh/a}$  und ein Carnot-Potenzial von  $174\text{ TWh/a}$  ermittelt. Die Industriebranchen mit dem höchsten Anteil am gesamten Abwärmepotenzial sind Eisen- und Stahl (22 %), Chemie und Petrochemie (22 %) sowie nicht-metallische Mineralien (14 %). Unter Berücksichtigung der jeweiligen Temperaturniveaus verschieben sich beim Carnot-Potenzial die genannten Anteile, jedoch bleiben die drei größten Branchen Eisen und Stahl mit 27 %, Chemie und Petrochemie mit 22 % und nicht-metallische Mineralien mit 17 %. Im Vergleich der Mitgliedsstaaten liegt Deutschland sowohl beim Abwärmepotenzial mit  $89,2\text{ TWh/a}$  (24 % des EU-weiten Potenzials) als auch beim Carnot-Potenzial  $42,8\text{ TWh/a}$  (25 % des europäischen Potenzials) vorne. In Deutschland ergeben sich die höchsten Anteile am gesamten Carnot-Potenzial in den Branchen Eisen und Stahl (32,7 %), Chemie und Petrochemie (27,8 %) und nicht-metallische Mineralien (15,7 %).

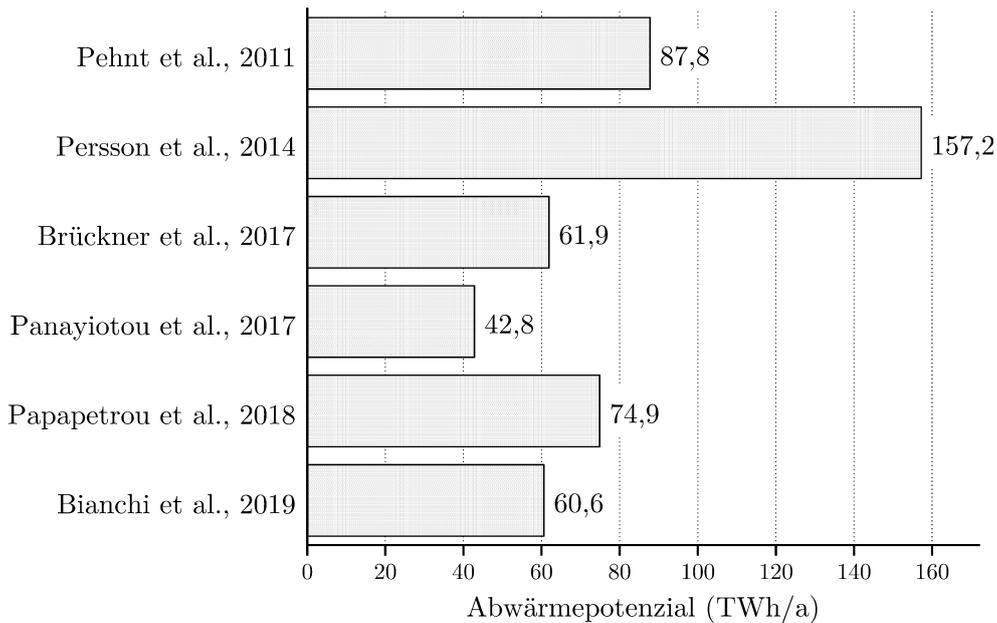
Papapetrou et al. [16] bestimmen das europäische Abwärmepotenzial aufbauend auf einer detaillierten Studie zu den Abwärmeanteilen in der Industrie im Vereinigten Königreich [17]. Hierbei bilden die Abwärmeanteile das Verhältnis von Abwärmepotenzial zu Prozesswärmebedarf. Die für die Jahre 2000 bis 2003 ermittelten Abwärmeanteile in der Industrie im Vereinigten Königreich werden von den Autoren auf die anderen EU28-Mitgliedsstaaten angepasst, indem für jeden Staat und jede Branche entsprechende Faktoren hinsichtlich der relativen Energieintensität im Vergleich zum Vereinigten Königreich genutzt werden. Eine Aktualisierung der Abwärmeanteile auf das Jahr 2015 stellt den nächsten methodischen Schritt dar. Zuletzt werden die erhaltenen Abwärmeanteile mit den Energieverbräuchen aus der Eurostat-Datenbank multipliziert und hierdurch die Abwärmepotenziale bestimmt. Herauszustellen ist die vergleichsweise hohe Auflösung der vorherrschenden Temperaturbereiche. Hierbei wird die Abwärme von  $< 100\text{ °C}$  bis  $> 1.000\text{ °C}$  in sieben Bereiche eingeteilt. Die Autoren ermitteln ein Abwärmepotenzial von 304 TWh/a, wobei ca. 100 TWh/a im Temperaturbereich von  $100\text{ °C}$  bis  $200\text{ °C}$  anfallen. Als Industriebranchen mit dem höchsten Abwärmepotenzial werden Eisen und Stahl, nicht-metallische Mineralien, Papier und Druck sowie Nichteisenmetalle identifiziert. Hinsichtlich des vorhandenen Potenzials liegt Deutschland mit 74,9 TWh/a im Vergleich der Mitgliedsstaaten vorne, was auf die Größe des Landes sowie die intensive industrielle Tätigkeit zurückgeführt wird.

Bianchi et al. [18] bestimmen das theoretische Abwärmepotenzial in der europäischen Industrielandschaft unter Anwendung des von Forman et al. [11] vorgestellten Top-down-Ansatzes auf Energiestatistiken für die Europäische Union aus dem Referenzjahr 2014. Als Datenbasis für den Primärenergieverbrauch der betrachteten Prozesse wird die Veröffentlichung von Panayiotou et al. [15] genutzt. Der Studie von Forman et al. [11] folgend, unterscheiden die Autoren bei den Abwärmepotenzialen zwischen Niedertemperatur- ( $< 100\text{ °C}$ ), Mitteltemperatur- ( $100\text{ °C} - 300\text{ °C}$ ) und Hochtemperatur-Abwärme ( $> 300\text{ °C}$ ). Das theoretische Abwärmepotenzial wird aus dem Primärenergieverbräuchen und den von Brückner et al. [19] vorgestellten Abwärmeverlust- und Temperatur-Koeffizienten bestimmt. Das Carnot-Potenzial, als Exergieanteil der Abwärme, wird basierend auf einer Referenztemperatur von 298,15 K bestimmt. Als Ergebnis für das theoretische Abwärmepotenzial werden 917,6 TWh/a angegeben, wohingegen für das Carnot-Potenzial 278,9 TWh/a ermittelt werden. Die entsprechenden Ergebnisse für Deutschland liegen bei 198,8 TWh/a und 60,6 TWh/a. Die größten Carnot-Potenziale für Deutschland werden in den Branchen Eisen und Stahl (14,4 TWh/a), Chemie und Petrochemie (8,9 TWh/a) und nicht-metallische Minerale (8,7 TWh/a) beobachtet.

Pehnt et al. [20] untersuchen das Abwärmepotenzial in der deutschen Industrie für Temperaturen  $> 140$  °C. Die Autoren stützen sich hierbei auf eine Studie des Energieversorgers Enova SF für die norwegische Industrie [21], die einen Bottom-up-Ansatz nutzt, und übertragen die Ergebnisse auf die deutsche Industrie. Die Methodik basiert auf der Verwendung von Abwärmeanteilen, die das Verhältnis aus ungenutzter Abwärme zu Energieverbrauch darstellen. Für das Abwärmepotenzial  $> 140$  °C wird ein Wert von 316 PJ/a (87,8 TWh/a) angegeben.

Brückner et al. [22] wenden erstmalig einen Bottom-up-Ansatz zur Bestimmung des Abwärmepotenzials in der deutschen Industrie an. Hierzu werden Emissionserklärungen aus dem Jahr 2008 auf Unternehmensebene ausgewertet, welche von den jeweiligen Landesministerien angefragt wurden. Es konnten Daten für alle Bundesländer, mit Ausnahme des Saarlandes, als Basis für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden. Zur Datenauswertung nutzen die Autoren eine dreistufige Methodik: Bewertung der Daten auf Verwendbarkeit, Abwärmebewertung sowie Gewichtung und Upscaling. Bei der Bewertung auf Verwendbarkeit führen Fehler wie eine nicht eindeutige Zuordnung eines Unternehmens zu einem Sektor, eine fehlende Angabe der verwendeten Brennstoffart bzw. des entsprechenden Heizwertes oder unplausible Temperaturniveaus zum Ausschluss der Daten. Zur Abwärmebewertung wird für jedes Unternehmen das Verhältnis aus Abwärmeenergie und zugeführter Brennstoffenergie gebildet. Da im ersten Schritt der Methodik Daten aufgrund von Fehlern ausgeschlossen werden, deckt die Datenbasis im dritten Schritt nicht mehr den vollständigen industriellen Sektor in Deutschland ab, weswegen eine Extrapolation der übrigen Daten angewandt wird. Die genutzte Datenbasis umfasst 58 % des Brennstoffbedarfs der deutschen Industrie und liefert als Ergebnis ein Abwärmepotenzial von mindestens 127 PJ/a (35,3 TWh/a). Eine Extrapolation der Daten auf den gesamten deutschen Industriesektor führt zu einem Ergebnis von mindestens 223 PJ/a (61,9 TWh) für das Abwärmepotenzial. Diese Energiemenge entspricht 13 % des Verbrauchs dieses Sektors, weshalb die industrielle Abwärmenutzung als interessante, CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequelle bewertet wird.

Zum Abschluss der Betrachtung des vorhandenen Abwärmepotenzials werden die oben angesprochenen Ergebnisse für den Industriesektor in Deutschland anhand von Abbildung 1 gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen eine Bandbreite von 42,8 TWh/a [15] bis 157,2 TWh/a [14] hinsichtlich des vorhandenen Potenzials.



**Abbildung 1: Studienergebnisse zum Abwärmepotenzial im deutschen Industriesektor**

Zur Nutzung des vorhandenen Abwärmepotenzials können verschiedene Technologien angewendet werden. Brückner et al. [4] stellen eine Charakterisierung der Technologien zur Abwämenutzung in passiven und aktiven Technologien vor. Zu den passiven Technologien zählen Wärmeübertrager und thermische Energiespeicher. Bei den aktiven Technologien unterscheiden die Autoren zwischen einer Wandlung der Abwärme in Wärme auf einem höheren Temperaturniveau, in Kälte oder in Strom. Als Technologien zur Abwärmeverstromung können thermodynamische Kreisprozesse wie der Clausius Rankine Cycle, der Kalina Cycle und der Organic Rankine Cycle genutzt werden.

Der Clausius Rankine Cycle wird zur Verstromung von Wärme bei Temperaturen  $> 400\text{ °C}$  [17] und Leistungen  $> 10\text{ MW}_{el}$  [23] eingesetzt. Bei kleineren Leistungen resultiert für das Arbeitsmedium Wasser ein niedriger Massenstrom in Verbindung mit einem hohen Enthalpiegefälle über die Expansionsmaschine, was technisch herausfordernd ist und zu einem geringen Wirkungsgrad führt [24]. Zudem sind beim Clausius Rankine Cycle typischerweise eingesetzte Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung, wie eine Speisewasservorwärmung mit einer hohen Anzahl an Dampfenntnahmestellen, für kleine Leistungen nicht wirtschaftlich darstellbar [24]. Für Anwendungen mit niedrigen bis mittleren Temperaturen ( $100\text{ °C} - 400\text{ °C}$ ) der Abwärme und Leistungen  $< 10\text{ MW}_{el}$  wird daher bevorzugt der Organic Rankine Cycle eingesetzt [25–28]. Im Gegensatz zum Clausius Rankine Cycle, der Wasser als Arbeitsmedium nutzt, werden in ORC-Anlagen organische Arbeitsmedien eingesetzt, wodurch sich ein weiterer Freiheitsgrad für die Auslegung des thermodynamischen Kreislaufs ergibt [28]. Häufig verwendete Arbeitsmedien sind Alkane wie Isopentan, Cycloalkane wie Cyclopentan, Aromaten wie Toluol, Kältemittel wie R245fa oder Siloxane wie Hexamethyldisiloxan [28]. Abbildung 2 zeigt schematisch den