

**ORC-Anlagen als Abwärme nutzende Anlagen zur Stromerzeugung:
FuE-Bedarf, Hemmnisse und Empfehlungen
- ein Statuspapier -**

Autor :

Prof. Dr. Eberhard Jochem

IREES GmbH

Durlacher Allee 77

76131 Karlsruhe

Tel.: 0721 / 9152636 26

E-Mail: e.jochem@irees.de

www.irees.de

Karlsruhe, den 27.01.2022

Korrigierte und erweiterte Analyse



Förderkennzeichen: 03ET1630A
Förderbereich: Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe,
Handel und Dienstleistungen (GHD)

Verbundpartner:

Technische Universität
Darmstadt**
**Konsortialführer



Karlsruher Institut für Technologie



Im Unterauftrag:

IREES GmbH



ETA-Solutions GmbH

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Jessica Walther
Technische Universität Darmstadt
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
Eugen Kogon Straße 4
D – 64287 Darmstadt
Tel. + 49 (6151) 16 20478
Fax + 49 (6151) 16 20087
info@ptw.tu-darmstadt.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

0. Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D.....	9
1. Beschreibung der untersuchten Technologie.....	10
2. Marktkontexturierung.....	13
3. Energietechnische und -wirtschaftliche sowie klimawandel-bezogene Bewertung	17
3.1. Energiewirtschaftliche Bewertung 2030 – 2050, Abschätzung des THG- Vermeidungspotentials.....	19
4. Technikzyklus-Analyse.....	23
4.1. Patent- und bibliometrische Analysen zur ORC-Technik.....	23
4.2. Die Position der ORC-Technik im Technikzyklus.....	25
4.3. ORC-Anlagen < 20 kWel - eine ungeklärte Wettbewerbssituation zu den thermo- elektrischen Generatoren	27
5. Innovationssystemanalyse.....	29
6. Ableitung möglicher Forschungs- und Entwicklungsziele (technisch und ökonomisch) ..	32
6.1. Produktionsprozess-Analysen - Nutzung der Exergie an geeigneten Prozess-Stufen.....	32
6.2. Abwärme-Nachbehandlung/ -übertragung - korrosionsfrei, fouling-resistent, kostengünstig.....	33
6.3. ORC-Arbeitsmaschinen und -Anlagen.....	33
6.4. Wärmetechnische und elektrische Einbindung von ORC-Anlagen.....	35
6.5. Speicherung	35
7. Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen	37

8. Multikriterielle Gesamtbewertung der ORC-Technik 2030 - 2050	40
9. Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen.....	42
10. Ergebniszusammenfassung für ORC-Anlagen.....	44
11. Literatur.....	45

Liste der Tabellen

Tabelle 1: Im Jahr 2012 in Deutschland realisierte ORC-Anlagen nach el. Leistung, Wirkungsgrad, Vorlauf- und Kondensationstemperatur, Arbeitsmedium, Maschinentyp und Referenzen	13
Tabelle 2: Realisierbare rentable Wärme- und Stromerzeugung durch ORC-Technik - mit und ohne Be-achtung konkurrierender Effizienztechniken & Energieträgerwechsel 2030-2050	20
Tabelle 3: Anzahl der international angemeldeten Patente zu vier Arbeitsmaschinengruppen von ORC-Anlagen für den Zeitraum 2009 bis 2016.....	23
Tabelle 4: Länderrangfolge für ORC-Patentanmeldungen (2009-2018) und Anzahl der Internationalen Publi-kationen (2010 bis 2019).....	24
Tabelle 5: Beispielhafte Auswahl zentraler Akteure im Bereich ORC-Technik in ihrem Innovationssystem.....	30
Tabelle 6: Bewertungskriterien und deren Indikatorik für die multikriterielle Bewertung.....	40
Tabelle 7: Bewertungskriterien und Bandbreite der Bewertung für die multikriterielle Bewertung.....	40
Tabelle 8: Operationalisierung des Kriteriums "Rentabilität" für die multikriterielle Bewertung.....	41

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Schema einer ORC-Anlage mit Thermoölkreislauf Quellen-seitig und Warmwasser eines Fernwärmenetzes auf Seiten der Abwärmesenke	11
Abbildung 2: Technische Abwärmepotentiale von stationären Anlagen in Deutschland, unterteilt nach Branchen und Temperatur, nur mediengebundene Abwärmeströme (ohne sensible Wärme von Produkten)	17
Abbildung 3: kumulierte vermiedene CO2-Emissionen durch ORC-Technik 2030 - 2050 - mit und ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen	21
Abbildung 4. Transnationale Patentanmeldungen zu ORC-Anlagen in vier verschiedenen Patent-unterklassen, 2000 bis 2018	24
Abbildung 5: Jährliche internationale Publikationen zur ORC-Technik, 2000 bis 2019	25
Abbildung 6: Der Technikzyklus und seine sechs verschiedenen Phasen mit ORC-Technik am Ende von Phase 4.....	26
Abbildung 7: Beispiel der Benennung von Abwärmeströmen eines Industriebetriebes (hier eines Kupol-Ofens einer Gießerei)	32
Abbildung 8: FuE-Bereich im Wärmequell-Temperatur-/elektr. Leistungs-Diagramm...	34

Abbildung 9: Bewertungs-Spinnen der multikriteriellen Analyse für ORC-Technik 2030 und 2050	41
Abbildung 10: Typische Struktur von EDUAR&D	9

Vorbemerkungen

Dieses Statuspapier zur Nutzung von Abwärme aus Industrie- und Gewerbeprozessen für die Stromerzeugung und Wärmenutzung (auf tieferem Temperatur-Niveau) hat folgende Ziele:

- den heutigen Stand der Technik und der Forschung der ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle) zu beschreiben,
- weitere als sinnvoll und notwendig erachtete Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu identifizieren und zu priorisieren,
- den heutigen und zukünftigen Stand der Marktdiffusion der ORC-Technik in der deutschen Wirtschaft (und im Ausland) sowie ihre heutigen in der deutschen Wirtschaft zu beobachtende Markteintrittsbarrieren zu besprechen, und
- aus den vorgehenden Ergebnissen Empfehlungen für die Bundesregierung, die Wirtschaftsverbände und weitere Dritte des Innovationssystems ORC-Technik abzugeben.

Im Energie-Forschungsprogramm der Bundesregierung wurde die ORC-Technik in den letzten 10 Jahren wie folgt gefördert:

In der EnArgus-Projekt Datenbank wurden drei Projekte zu ORC-Anlagen ausgewiesen. Davon

- sind zwei Projekte abgeschlossen, eines lief noch bis September 2021;
- die beiden im Jahr 2016 bzw. 2018 abgeschlossenen FuE-Projekte hatten ein Fördervolumen von 7,32 Mio. € bzw. von 2,46 Mio. €; das noch laufende FuE-Projekt hat ein Fördervolumen von 0,38 Mio. €.
- Beim zuerst abgeschlossenen FuE-Projekt waren im Konsortium fünf Partner beteiligt, in den beiden folgenden FuE-Projekten zwei Partner.

Die größeren Projekte, die größeren Forschungsteams und hohen Fördervolumen der beiden abgeschlossenen FuE-Projekte könnten es nahelegen, dass sich die ORC-Anlagen derzeit am Beginn der (Nischen-)Marktdiffusion befinden.

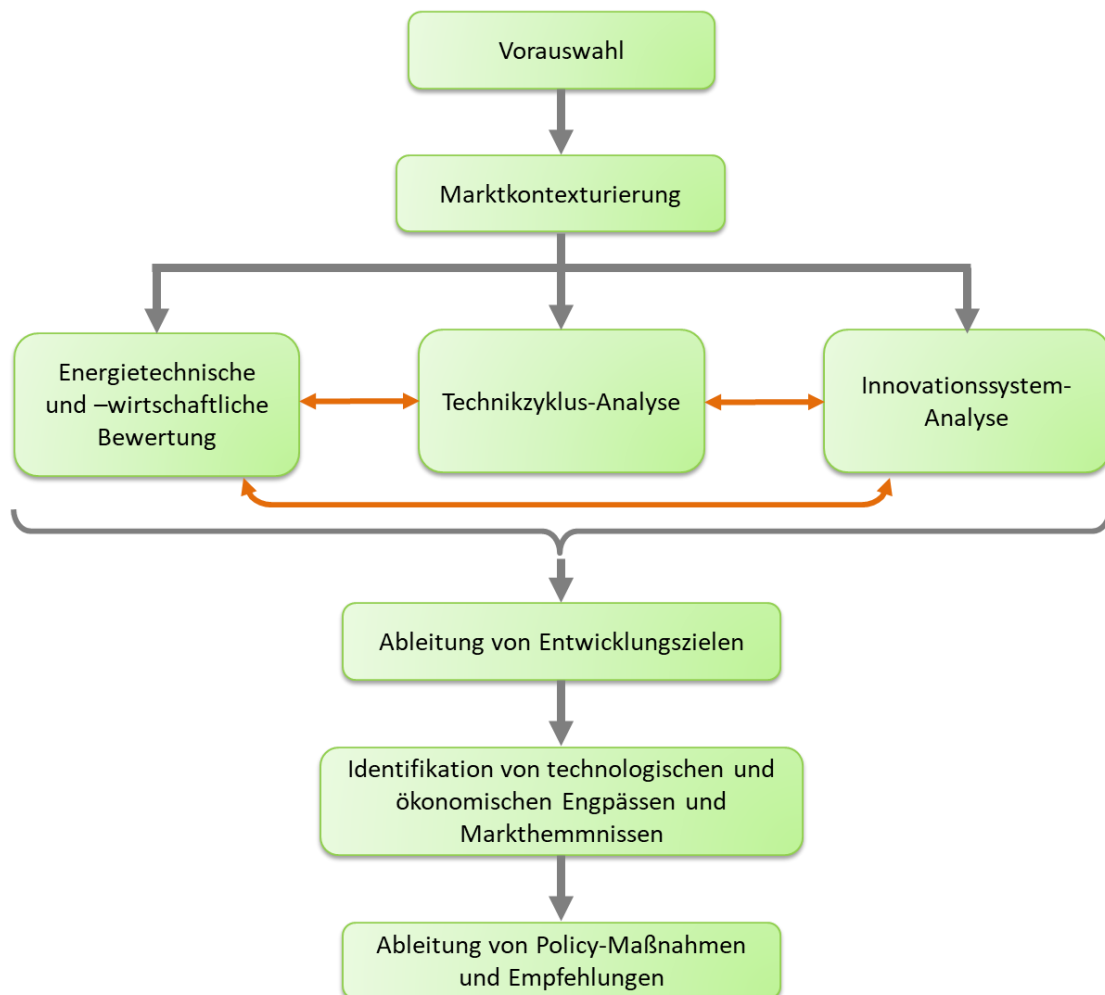
Im Jahre 2021 wurden drei relativ kurz laufende FuE-Projekte gestartet, die jeweils eine ORC-Anlagenanwendung in der Glas-Industrie, der Aluminium-Herstellung und in der Zementindustrie (Klinkerkühlung) verfolgen (EnArgus 2021). Auch diese FuE-Projekte deuten darauf hin, dass die ORC-Technik sich am Beginn der Marktdiffusion befinden könnte.

Angesichts der großen Spreizung der elektrischen Leistungen von ORC-Anlagen zwischen 5 kW und 15 MW könnte es auch sein, dass ihre Verortung im Technik-Zyklus auch von Faktoren wie der Klasse der elektrischen Leistung oder von Problemen der Wärmeübertragung auf Seiten der Wärmequelle abhängt.

Dies gilt es genauer zu prüfen wie auch die Einsatzbedingungen, beispielsweise bzgl. des Temperatur-Niveaus oder der Abgasbelastungen (als KWK-Anlage geeignet oder nicht), der Entscheidungs routinen der Investoren oder der Wärmemedien und spezieller Anforderungen an die Wärmeübertrager, um Empfehlungen zu weiteren FuE-Vorhaben auf dem Gebiet aussprechen zu können.

0. Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D

EDUAR&D, kurz für „Energiedaten und -analyse R&D“, ist die im Rahmen des Projekts EE4InG genutzte Methodik zur Bewertung von vielversprechenden Techniken, die potenziell zu einer erheblichen Senkung des Energiebedarfs und/oder der Treibhausgasemissionen in den Forschungsfeldern (und teilweise darüber hinaus beitragen könnten). EDUAR&D ist ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedenste methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Techniken miteinander verbindet (vgl. Abbildung 1). Dabei muss nicht zwangsläufig jede EDUAR&D-Analyse das gesamte Tableau der verfügbaren Methoden nutzen; dies ist teilweise abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationsquellen. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen (z.B. bzgl. thematischer Schwerpunktsetzungen, Intensivierung bestehender Förderungen etc.) für die zukünftige Energieforschung des Bundes abzuleiten. Die EDUAR&D-Methodik wurde im Auftrag des BMWi am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelt (Jochem et al. 2009).



Quelle: eigene Darstellung IREES

Abbildung 1: Typische Struktur von EDUAR&D

Für die durch einen knappen Vorauswahlprozess identifizierte Technik (beispielsweise anhand ihrer potenziellen Relevanz für den Energieverbrauch oder die THG-Emissionen einer Branche oder eines bestimmten Produktionsprozesses) wird zunächst eine Marktkontexturierung durchgeführt. Diese beschreibt die Regionalität der denkbaren Märkte und die derzeitige oder

absehbar überwiegende Marktform (Monopol – Polypol) sowie mögliche Konkurrenztechniken und die hierdurch absehbare Wettbewerbsintensität.

Zentraler und komplexester Teil ist die dreigliedrige Analyse, die aus einer energie-technischen/-wirtschaftlichen Bewertung, einer Technikzyklus-Analyse sowie einer Innovationssystem-Analyse besteht. Die energietechnische/-wirtschaftliche Bewertung kann verschiedene Komponenten beinhalten, wie eine erste Abschätzung des möglichen Einflusses der betrachteten Technik auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen (eine entsprechende Diffusion vorausgesetzt), die Angabe von Kosten-Nutzen-Indikatoren sowie weitere Bewertungen, z.B. bzgl. eines möglichen Exportpotenzials.

Die Technikzyklus-Analyse dient dazu, die technologische und ökonomische Marktnähe der Technik besser verorten zu können. Die sechs Phasen des Technikzyklus können auch dazu dienen, je nach Verortung der Technik, zielgerichtete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Verortung im Technikzyklus kann durch Patent- und Publikationsanalysen unterstützt werden (z.B. über das Verhältnis von Grundlagen- bzw. Anwendungspatenten oder die Zunahme oder Abnahme von Patenten und Publikationen über die Zeit). Auch eine SWOT-Analyse kann Bestandteil der Technikzyklus-Analyse sein.

Gemäß der Definition in Carlsson et al. (2002) generieren, verbreiten und nutzen Innovationssysteme Innovationen. Sie setzen sich zusammen aus Komponenten und Relationen, wobei erstere Akteure, Techniken und den regulatorischen Rahmen (inkl. Förderpolitik) umfassen, und letztere die vielfältigen formellen und informellen Beziehungen zwischen diesen Komponenten.

Die Analyse schließt mit der Identifikation möglicher Entwicklungsziele sowie mit technischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen. Hieraus werden dann Handlungsempfehlungen abgeleitet. Im Rahmen des Vorhabens EE4InG dienen die EDUAR&D-Technikanalysen als Input für Expertengespräche und werden in Folge dieser Gespräche ergänzt.

1. Beschreibung der untersuchten Technologie

Die ORC-Technik ist schon seit einigen Jahrzehnten im Gespräch für die Nutzung von Abwärme mit Temperaturen von unterhalb etwa 550°C bis zu etwa 80°C mit dem Ziel der Stromerzeugung und damit der Nutzung der Exergie von Abwärmeströmen (Ingwersen 1986; Maier/ Angerer 1986). Oberhalb dieses Temperatur-Niveaus sind konventionelle Dampfkraftwerke (auch als KWK-Anlagen) aus thermodynamischen, technischen und Kosten-Gründen den ORC-Anlagen überlegen. Je tiefer diese Vorlauftemperaturen sind und je kleiner die Leistung der Arbeitsmaschine (Turbinen, Kolbenmaschinen, Schraubenexpander), desto geringer ist allerdings der elektrische Wirkungsgrad (zwischen 21 % und 7 %; vgl. Tabelle 1). Man wird daher davon ausgehen, dass sich im kleineren Leistungsbereich die modular-aufgebaute Technik der Thermo-Elektrischen Generatoren (TEG) mit ca. 10 % Wirkungsgrad und Moduleinheiten von etwa 1 kW einen ihr angemessenen Markt- und Anwendungsbereich in den kommenden Jahren eröffnen wird (Reitze u.a. 2021).

Abwärmequellen mit einer hohen thermischen Leistung ab 2,5 MW_{th} und höheren Temperaturen (>200°C) werden heute in einer Reihe von Thermoprozessen genutzt, setzen aber meist einen kontinuierlichen Abwärmeeinfall voraus, um hohe Jahresnutzungsstunden angesichts der hohen Investitionssumme zu erzielen (vgl. Abbildung 2).

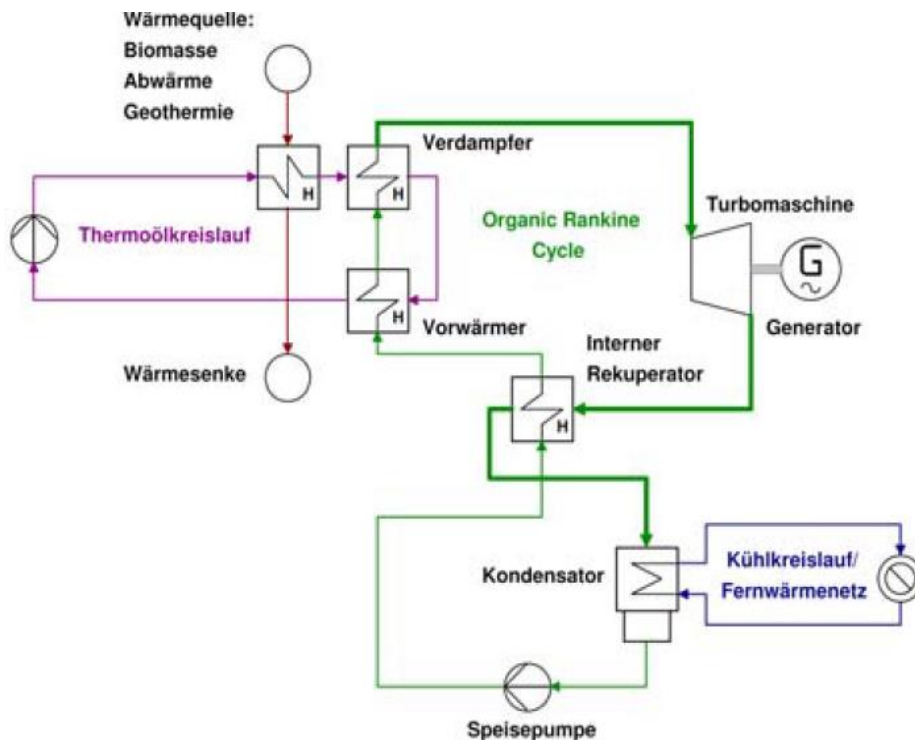


Abbildung 2: Schema einer ORC-Anlage mit Thermoölkreislauf Quellen-seitig und Warmwasser eines Fernwärmenetzes auf Seiten der Abwärmesenke

Wärmeträger sind i.a. Thermo-Öl ($>130^{\circ}\text{C}$) oder Heißwasser ($<130^{\circ}\text{C}$), die die Wärme an die meist organischen Arbeitsmedien abgeben bzw. entnehmen. Die Arbeitsmedien in der ORC-Anlage hängen von den Vorlauf- und Kondensations-Temperaturen ab; meist sind es Kohlenwasserstoffe (z. B. Ethanol, aromatische Kohlenwasserstoffe, Silikon-Öle) oder Fluorkohlenwasserstoffe (z.B. R245fa, Pentafluorpropan) mit relativ hohen spezifischen Treibhaus-gaspotenzialen (vgl. Tabelle 1).

Im Batch-Betrieb gefahrene Öfen, HT- oder NT-Wärmeprozesse sind meist weniger oder ungeeignet, weil sie entweder zu geringe Jahresnutzungsstunden aufweisen oder zu zusätzlichen Speicherkosten führen und damit wenig rentabel bzw. unwirtschaftlich sind. Wegen der heute hohen spezifischen Investitionssumme kann eine Wirtschaftlichkeit i.a. nur bei relativ hohen Jahresnutzungsstunden (größer 6.000 bis 7.000 h) erwartet werden.

Kolbenmaschinen sind bei variablen Abwärmeströmen weniger anfällig als Turbinen (z.B. bei Stoßöfen von Stahlwerken, Härterei-Öfen und dergleichen). Angesichts der deutschen Fördergesetzgebung sind ORC-Anlagen, die als Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK) betrieben werden (können), wirtschaftlich meist deutlich attraktiver als jene mit niedrigeren Temperaturen und reiner Stromerzeugung; allerdings gibt es auch eine erhebliche Benachteiligung durch die Erhebung einer 40%igen EEG-Umlage (vgl. Abschnitt 7).

Bei der Nutzung von Ofenabgasen tritt allerdings häufiger das Problem des Foulings der Wärmetauscher durch die mit Staub und Kondensaten belasteten Abgase auf. Daher wird häufig auf einen Abhitzeessel unter hohen Exergie-Verlusten ausgewichen (Arbeitstemperaturen nur um die 150°C). Bei sehr hohen Temperaturen ($>520^{\circ}\text{C}$) wird oft durch Falschluff-Einzug oder Rezirkulation des Abluftstroms die Eingangstemperatur - und damit der Exergie-Gehalt des Abwärmestroms - abgesenkt.

Bei Anwendungen in der Industrie müssen oft 30 bis 50 % der ORC-Anlage an die jeweiligen prozesstechnischen oder räumlichen Gegebenheiten angepasst werden, so dass höhere Investitionssummen gegenüber Standard-Lösungen (z.B. an Bio-BHKW angeschlossene ORC-Anlagen) verständlich sind. Auch müssen bei Industrieanwendungen zuweilen die Re-Investitionszyklen beachtet und genutzt werden, um eine ORC-Anlage zu installieren (z.B. bei der Neuauskleidung von Glaswannen, alle 10 bis 13 Jahre).

Geothermisch betriebene ORC-Anlagen sind i.a. nicht KWK-fähig infolge der niedrigen Eintrittstemperaturen von $<120^{\circ}\text{C}$ und Kondensations-Temperaturen um die 25°C (Frick/Kaltschmitt 2009). Nachteilig ist bei diesen Anlagen auch ein hoher Strombedarf für Ventilatoren der Kühlung. Dies könnte sich in mittlerer Zukunft ändern, wenn das Temperatur-Niveau von Fernwärmesystemen abgesenkt wird und zugleich die Vorlauftemperatur mit Sorptions-Wärmepumpen noch etwas auf z.B. 160°C angehoben würde.

2. Marktkontexturierung

Für die Nutzung von Abwärme zur Stromerzeugung ist die ORC-Technik die am weitesten entwickelte Technik. IZES (2017) bewertet die Technik mit den Werten 6 bis 9 des Technology Readiness Level.

In Deutschland werden derzeit knapp 200 ORC-Anlagen mit Vorlauftemperaturen zwischen 80°C und 520°C mit elektrischen Leistungen von mehr als 50 kW_{el} und weniger als 2.500 kW_{el} betrieben (ORC-Fachverband 2018). Die Anwendungsfälle sind bei geeigneten Prozessen und Standorten der Grundstoff-Industrie (z.B. Sekundär-Aluminium-Herstellung, Glasherstellung, Grundstoff-Chemie), der Metallherzeugung und -verarbeitung mit Abwärmern aus verschiedenen Öfen, sowie der Gummiverarbeitung (vgl. Tabelle 1). Die Anwendungen haben gute Chancen der Marktdiffusion - auch weltweit - bei den genannten Prozessen und Branchen, besonders bei folgenden Bedingungen:

- relativ hohe Jahresnutzungsstunden (möglichst > 5.000 h),
- hoher Strompreis des bezogenen Stroms (was allerdings bei den energieintensiven Branchen in Deutschland wegen Ausnahmegenehmigungen von Energie-Steuern, EEG-Umlagen und -abgaben oder kostenlos zugeteilten CO₂-Zertifikaten häufig nicht zutrifft (vgl. Kap. 7), wo derzeit fünf bis sechs €/cts/kWh Strom veranschlagt werden),
- keine günstige eigene Verwendungsoption der Abwärme (z.B. kein eigener Wärmebedarf, aber ein relativ hohes Temperaturgefälle für ein Nahwärmenetz im Industriegebiet oder für nahe liegendes Fernwärmenetz).

Tabelle 1: Im Jahr 2012 in Deutschland realisierte ORC-Anlagen nach el. Leistung, Wirkungsgrad, Vorlauf- und Kondensationstemperatur, Arbeitsmedium, Maschinentyp und Referenzen

Unternehmen	Leistung (netto, in kW _{el})	El. Wirkungsgrad (bezogen auf die Wärmequelle)	Vorlauftemperatur	Kondensationsniveau	Arbeitsmedium	Entspannungsmaschine	Referenzen
Adoratec GmbH*, Mannheim	280 – 2280	15,5 – 21 %	270 °C; 320 – 325 °C	120 °C	Silikonöl	Turbine	40 Anlagen
Bosch KWK Systeme GmbH, Lollar	30 – 300	10 % bei 120 °C	100 – 150 °C	60 °C	R245fa	Turbine	Deponiegas-, Biogas-, Klärgas-BHKW sowie Industrie-Abwärmennutzung
Conpower Technik GmbH, Kaufungen	11 – 63	7,5 % bei 85 °C	85 °C	30 °C	Solkane SES36	einstufige Radialturbine	BGA Friedrichsfeld, Trendelburg bei Kassel
Devetec GmbH, Saarbrücken	200	12,5 % bei 250 °C	200 – 250 °C	79 °C	Ethanol	Kolbenmaschine	Anlage am Grubengasmotorenkraftwerk Völklingen-Fenne, BGA Kirchwalsede
Dürt Cyplan Ltd., Bietigheim-Bissingen	50 – 500	6 – 9 % bei 90 °C / 16 – 20 % bei 350 °C	90 – 600 °C	30 – 95 °C	Silikonöl, Kohlenwasserstoffe	Turbogenerator	10 Referenzanlagen
Fraunhofer-Institut Umsicht, Oberhausen	50, 60, 120	8 % bei 95 °C / 18 % bei 500 °C	85 – 110 °C, 160 – 200 °C	33 – 80 °C	Kohlenwasserstoffe	Radial-Gleichdruckturbine	5 Feldtestanlagen in Betrieb, weitere in Planung
Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen mbH, Bargeshagen	30 – 5000	8,5 – 18 %	100 – 320 °C	85 – 90 °C	organische Medien (WL220), Kohlenwasserstoffe (GL160)	Schraubenexpander bzw. Turbine	20 Biomasseanlagen in Deutschland, Geothermie
ORC energy GmbH, Dortmund	20, 30	14 % bei 450 – 550 °C	entspricht (wegen Direktverdampfer) der Abgastemperatur	85 – 95 °C	destilliertes Wasser	Zweizylinder-Dampfkolbenmotor	Anlage bei Heidenheim, weitere in Planung
Ormatic GbR, Berlin	100	10 %	130 °C	20 – 50 °C	verschiedene Arbeitsmedien	Turbine	Anlagen weltweit
tec-concept, Meerane	3,5 – 30	10 % bei 90 °C	90 °C	20 °C	R245fa	Zentripetal-turbine	Feldtestanlagen
Triogen B.V., Goor, Niederlande	60 – 160	16 – 20 % bei 180 °C	350 – 550 °C	55 – 80 °C	aromatische Kohlenwasserstoffe	einstufige Radialturbine	mehrere Anlagen in fünf europäischen Ländern
Turboden s.r.l., Brescia, Italien	600 – 3000	19 % bei 310 – 312 °C	140 – 312 °C	35 – 90 °C	organische Arbeitsmedien	Turbine	80 Anlagen in Deutschland, 200 weltweit

*Die gleichen Produkte sind auch bei der Maxxtec AG erhältlich

Quelle: Energie & Management 2012

Im außer-industriellen Bereich werden ORC-Anlagen bei speziellen Nutzungen angewandt, z.B. bei der Abwärmenutzung von Biogas- oder Deponiergas-BHKW und Temperaturen zwischen 400 und 510°C bei Leistungen zwischen 50 und 80 kW_{el}. (Oberberger et al. 2005 und 2008).

Für die geringe Zahl der bei den gegebenen Rahmenbedingungen denkbaren Investitionen in ORC-Anlagen war die Anzahl der Hersteller in Europa Anfang der 2010er Jahre relativ groß, sie ist wahrscheinlich auch auf die Effekte der euphorischen Phase dieser Technikentwicklung in jener Zeit zurückzuführen. Denn von den im Jahre 2012 anbietenden 12 Unternehmen (Adoratec, Bosch, Conpower, die Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen, Devetec, Dürr Cyplan, Maxxtec, Orcan, ORC energy, Ormatic, Siemens, Turboden, vgl. Tabelle 1) sind Ende 2021 noch drei deutsche Hersteller aktiv am Markt: Dürr Cyplan, INTEC GMK und Orcan.

Neben sehr kleinen Fertigungslosen - wenn nicht Einzelfertigung bzw. -planung der ORC-Anlagen - führte die Gesetzgebung in Deutschland im Rahmen der EEG-Umlagen-Regelung ab 2017 dazu, dass viele der o.g. Hersteller ihre Produktion einstellten oder in die Insolvenz gehen mussten. Selbst der ORC-Verband musste im Jahre 2018 seine Arbeit einstellen.

Die verbliebenen Anbieter von ORC-Anlagen vermarkten Anlagen ab einer thermischen Leistung von 250 kW_{th} und Vorlauftemperaturen für die ORC-Anlage von 90 °C bis 520 °C. Anlagen mit einer Leistung kleiner als 20 kW_{el} werden bisher nur als Pilotanlagen betrieben. Beispiele des Einsatzes von Erstanwendungsbereichen sind (vgl. Tabelle 1):

- Wärme aus den Abgasen von BHKWs zur Erhöhung der Gesamtstromausbeute (z.B. von Klär-, Deponie-, Gruben- und Biogas-BHKWs),
- Abwärme bei automatisch betriebenen Hackschnitzelkesseln (Viessmann) mit einer ORC-Anlage (elektrische Leistung von 190 kW_{el}),
- Abwärmenutzung aus der Klärgas- bzw. Biogasverbrennung (el. Leistung bei 60 bis 200 kW_{el}) (Oberberger et al. 2005 und 2008),
- Abwärmenutzung bei Stahlveredlern, z.B. Nutzung des Rauchgases einer Heißwind-Kuppelofenanlage (mit erreichbaren elektrischen Leistungen um 200 kW_{el}), oder aus den Abgasen von Glas-, Keramik- und Ziegel-Öfen (Kolasiński 2019).
- Einsatz von Kolbenmotor- oder sehr großen Turbinen-Anlagen als Direktantrieb (z.B. für Druckluftherzeuger, Kältekompressoren oder Pumpen).

Die in Deutschland etwa 200 laufenden ORC-Anlagen haben sehr unterschiedliche Leistungsgrößen und werden in unterschiedlichen Temperaturbereichen eingesetzt (vgl. Tabelle 1). Damit handelt es sich um Produkte aus Kleinserien (wenn nicht um Unikate) mit sehr hohen spezifischen Investitionssummen von mehr als 3.000 €/kW_{el} (je nach Leistungsgröße). Bei 7.500 Jahresnutzungsstunden und einer unterstellten Kapitalrückflusszeit von vier Jahren betragen allein die Kapitalkosten noch knapp 10 cts/kWh, d.h., sie liegen meist oberhalb der heutigen Erzeugungskosten für PV- oder Windenergie-Strom.

Im Bereich <150°C Abwärme-Eingangstemperatur hat ein Hersteller ein modulares Anlagenkonzept entwickelt, das sehr viel mit konventionellen Bauteilen arbeitet und damit die Investitionssumme senkt. Der Nachteil liegt darin - ähnlich wie die Nutzung über Abhitzeessel -, dass viel Exergie nicht genutzt werden kann und die Anlagen nicht mehr im KWK-Betrieb arbeiten.

Für niedrigere Abwärmeleistungen (z.B. < 200 kW_{th} oder < 20 kW_{el}) fehlt es bislang an marktfähigen Lösungen. Das Projekt 03ET1113 "Energiesparende Industrieverfahren - Wärmetransformatoren/ORC-Anlagen" (2015 bis 2018) führte nicht zu dem angestrebten Ziel, die

spezifischen Investitionen auf etwa 1.000 €/kW_{el} zu senken. Die *technischen Wettbewerber* der ORC-Anlagenutzung sind insbesondere:

- die Verwertung der Abwärmern in anderen Prozessschritten als Wärmequelle, z.B. Vorerwärmung von Rohstoffen der betroffenen Grundstoff-Industriezweige oder von Verbrennungszuluft, dann allerdings mit hohem Exergieverlust wegen der Begrenzung der Temperatur auf 80°C, oder
- in der direkten Einspeisung in Nah- oder Fernwärmenetze. Letztere Lösung hat insbesondere den Vorteil, dass der Wärme-abgebende Betrieb sich um die Nutzung der Abwärme im operativen Produktionsalltag nicht mehr zu kümmern braucht. Dennoch könnte man hier oft die ORC-Technik zur Nutzung der Exergie zwischenschalten (kaskadenhafte Nutzung der Abwärme).
- Im kleinen Leistungsbereich haben Thermoelektrische-Generatoren (TEG) eine Chance infolge ihres modularen Aufbaus und möglicher Skaleneffekte (Reitze u.a. 2021).
- Hinzu kommt der Kosten-Wettbewerb der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Schon heute ist in manchen Regionen der Strom an Wochenenden zu 100 % aus erneuerbaren Energien und für größere Industrieunternehmen über die Strombörse zeitweise sehr preiswert. Diese Situation könnte sich mit zunehmenden Anteilen von den erneuerbaren Energien, insbesondere PV und Windenergie, weiter erhöhen, je nachdem, wie sich die Märkte für flexible Stromnachfrage und Power to x entwickeln. Auch künftige Änderungen am Strommarktdesign könnten hier eine relevante Rolle spielen.

Angesichts der Spezialisierung der ORC-Anlagen-Anbieter in den letzten Jahren könnte man von einem Anbieter-Oligopol bei einem Nachfrage-Polypol sprechen. Allerdings kann dieses Hersteller-Oligopol wegen zu geringer Nachfrage kaum seine Vorteile realisieren.

Die Risiken bei Contracting-Lösungen und Ausfall der Abwärmequelle können bei kleineren Leistungen besser abgedeckt werden. Die geforderte Wärmeversorgung könnte z. B. durch einen auf Reserve stehenden Holz hackschnitzel-gefeuerten Kessel gewährleistet werden. Bei Liquidation oder völliger Produktionsumstellung des Abwärme-liefernden Betriebes sind NT- und HT-ORC-Anlagen bis zu 500 kW_{el} abbaubar und transportfähig. Bei Heißgas-ORC-Anlagen liegt die Leistung der transportablen ORC-Einheiten wegen der großen Luftwärmetauscher eher bei maximal 200 - 250 kW_{el}.

Bei der Frage der Alternativen der Nutzung von Abwärme liegt der Schluss nahe, dass die ORC-Anlagen durch die optionalen Abwärmeverwendungen sowie durch die Strom-Erzeugung mit erneuerbaren Energien eine intensive Wettbewerbssituation haben, was die Abschätzung eines realistischen Anwendungs-Potentials aus energiewirtschaftlicher Sicht sehr erschwert und unsicher macht (vgl. folgenden Abschnitt 3).

Das wirtschaftliche Potential der ORC-Anlagen ist wegen der Vielfalt der Anwendungen und Rahmenbedingungen kaum abschätzbar. Sehr wichtig für die wirtschaftliche Nutzung sind:

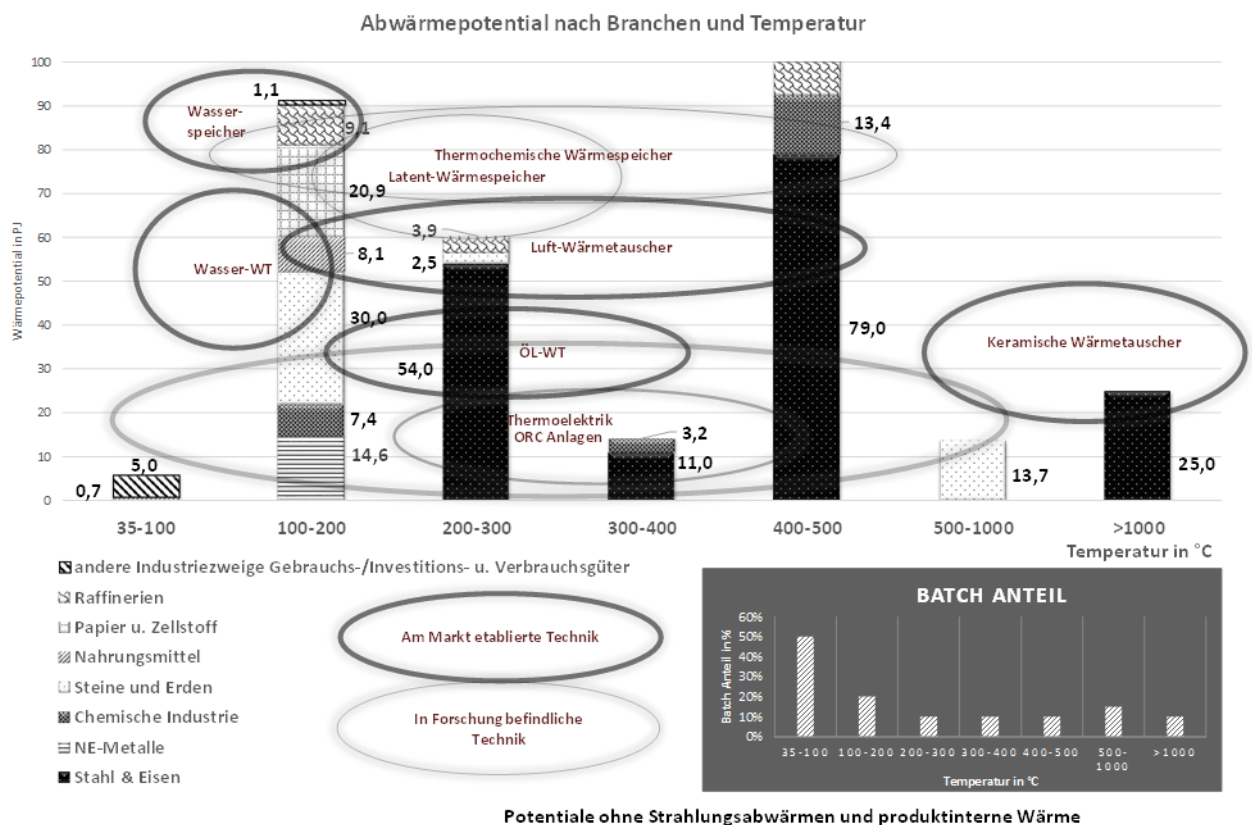
- die Förderung der Investition, (zumal hier keine Betriebskosten außer Wartungskosten anfallen, was von beratenden Ingenieuren und Betrieben oft übersehen wird),
- der Eigenverbrauch des erzeugten Stroms (bei Anwendern und Contractoren),
- derzeit sehr negativ: die 40 % Beteiligung an der EEG-Umlage für Eigenstrom.

Andererseits ist die Nichtnutzung von HT-Abwärme in so vielen möglichen Fällen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht eine enorme Ressourcenverschwendung (viele 100 PJ), die im Wesentlichen daran scheitert, dass ORC-Anlagen nicht in größeren Serien hergestellt werden, daher ihre Investitionssumme je Einzelinvestition zu hoch ist und sie somit aus betriebswirtschaftlichen Gründen bei den potentiellen Anwendern kaum realisiert werden (vgl. Kapitel 7).

3. Energietechnische und -wirtschaftliche sowie klimawandel-bezogene Bewertung

Von den rund 150 PJ/a Abwärme, die im Temperaturbereich zwischen 90°C und 500°C in der deutschen Industrie als technisch-wirtschaftlich nutzbar anfallen, sind in bestimmten Branchen und Prozess-Bereichen die Abwärmeströme prozessbedingt intermittierend und damit für die ORC-Anlagen nur in Kombination mit einem entsprechenden Speicher als technisch geeignet anzusehen (vgl. Abbildung 3). Die zusätzlichen Speicherkosten dürften aber häufiger die Wettbewerbssituation der ORC-Anlagennutzung gegenüber anderen Abwärmennutzungs-Optionen oder gegenüber dem optionalen Strombezug oft so weit verschlechtern, dass diese intermittierenden Abwärmeströme nur zum Teil zu dem Potential der ORC-Anlagen gezählt werden können.

Diese sind insbesondere in den Niedrig- und Mittel-Temperaturbereichen (<200°C) zu erwarten (z.B. in der pharmazeutischen Industrie, der Textilveredlung, der Metallverarbeitung und anderen Gebrauchsgüter-Industriezweigen mit ihren Batch-Prozessen). Andererseits werden die HT-Abwärmeströme auch im intermittierenden Bereich - zumal bei Einsatz von Kolbenmaschinen mit besserer Anpassungsfähigkeit an variierende Abwärmeströme - der breiten Nutzung zugänglich werden, wenn die ökonomischen Rahmenbedingungen angepasst würden (vgl. Abschnitt 7).



Quelle: Brückner, S. 2016; Papapetrou, M. et al. 2018 & weitere Quellen

Abbildung 3: Technische Abwärmepotentiale von stationären Anlagen in Deutschland, unterteilt nach Branchen und Temperatur, nur mediengebundene Abwärmeströme (ohne sensible Wärme von Produkten)

Insgesamt wird dieser intermittierende Anteil der Abwärmeströme zwischen 90°C und 500°C auf etwa 70 PJ, d.h. die Hälfte des vorhandenen Potentials in der deutschen Industrie geschätzt (vgl. Abbildung 3). Bei diesen Potentialangaben muss berücksichtigt werden, dass

- die Potentiale in aller Regel unter Nutzung von energiewirtschaftlichen Statistiken Top-Down geschätzt wurden und
- die Angaben nicht durch Bottom-up-Erhebungen, d.h. durch Prozessanalysen, plausibilisiert wurden. Hierdurch entstehen Unsicherheiten insbesondere im Hinblick auf das Temperatur-Niveau der Abwärmern (z. B. wenn Rauchgas mit 600°C auf 200°C abgekühlt werden muss, um durch eine Filteranlage geleitet werden zu können, dann fragt man sich bei den Top Down-Analysen, welches Temperatur-Niveau von den Autoren unterstellt wurde).

Das Potential für die ORC-Anlagen-Nutzung reduziert sich weiter durch folgende technische Wettbewerber:

- Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze, was bei Vorhandensein für viele Betriebe mit Abwärmertemperaturen < 200°C die einfache Lösung ist, um sich auf die Kernkompetenz ihrer jeweiligen Produktion konzentrieren zu können (vgl. Abschnitt 7).
- Zudem dürften bisher nicht realisierte betriebsinterne Optimierungslösungen (pinch-Methode; Vorerwärmung von Produkten und Verbrennungsluft; Vermeidung von Zwischenerhitzung bei der Metallverarbeitung) manche Potentialverminderungen nach sich ziehen. Weiterhin kann es zu Prozesssubstitutionen kommen (vgl. Abschnitt 3.2).
- Möglicherweise werden auch günstige Zeiten des Strombezugs mit sehr niedrigen Strompreisen ein Wettbewerber, der die Jahresnutzungsstunden von ORC-Anlagen bei größeren Standorten reduziert.
- Hinzu kommt in Zukunft der Umstand, dass manche Prozess-Ofenanwendung mit heute noch fossilen Brennstoffen auf elektrothermische Verfahren mit wesentlich geringeren gefassten Abwärmeströmen umgestellt werden könnten (z.B. Glasschmelzen, Härtereier-, Anlass- und Nitrieröfen, Trockner).

Andererseits werden bisher die sensiblen Wärmen von erzeugten Zwischen- und Endprodukten nicht als nutzbare Abwärmern angesehen. Sie sind auch in den Potentialangaben in Abbildung 3 nicht enthalten. Diese Nutzung könnte in Zukunft auch ein weiteres Nutzungspotential von ORC-Anlagen eröffnen, insbesondere bei der Metall-, Glas- und Keramik-Erzeugung und ihren Weiterbehandlungsverfahren in Ofenprozessen über/ um 500°C.

Unterstellt man, dass das verbleibende Potential von 80 PJ/a Abwärme zu etwa zwei Dritteln von diesen beiden ökonomisch günstigeren Verwendungsoptionen aufgegriffen wird, blieben etwa 25 PJ/a Abwärme für die ORC-Anlagen-Anwendung. König u.a. (2019) kommen bei einer Teilanalyse von fünf energieintensiven Branchen zu dem Ergebnis, dass hier 2,3 TWh Abwärme anfällt (oder 8,3 PJ), die wenigstens zum Teil für ORC-Anlagen eine Chance darstellen.

Andererseits schätzt Ziegler (2011) den gesamten deutschen Markt für kleinere ORC-Anlagen auf rund 1.200 bis 1.500 Anlagen. Typische Anwendungen für ORC-Anlagen fänden sich bei Gasmotoren und vielen Industrieprozessen mit Abwärmern bis zu 600 °C. Bei durchschnittlichen elektrischen Leistungen von 200 kW_{el}, einem Wirkungsgrad von 14 % und 7.500 Volllaststunden würde dadurch eine jährliche Stromerzeugung von 1,8 TWh/a ermöglicht. Dafür müssten etwa 13 TWh/a Abwärme (oder 46 PJ/a) zur Verfügung stehen.

Vielleicht beachtet Ziegler (2011) zu wenig die o.g. technischen Wettbewerber der Abwärmennutzung (vgl. auch Abschnitt 2 und 3.2).

Nicht-KWK-Anwendungsbereiche

Ein weiteres Anwendungsfeld der ORC-Anlagen könnte durch die intensive Nutzung von geothermischer Wärme entstehen, die bei hinreichender Quelltemperatur und Temperaturspreizung auch als KWK-Anlagen betrieben werden könnten, da sie sehr hohe Jahresnutzungszeiten erreichen. Wenngleich auch hier die einfache Fernwärmenutzung (bei höheren Vorlauftemperaturen) der geborene Wettbewerber ist, so sind hier doch deutliche Skaleneffekte für die Herstellungskosten von ORC-Anlagen im mittleren bis oberen Leistungsbereich oder als modular aufgestellte Anlagen mit Leistungen zwischen 200 bis 500 kW_{el} denkbar.

Zusätzlich kann in Zukunft eine Nachfrage in sonnenreichen Ländern für die Erzeugung von Strom aus solar-thermischen Anlagen mit Rinnenkollektoren entstehen (Stiglitz/ Heinzel 2013, S.487 ff).

3.1. Energiewirtschaftliche Bewertung 2030 – 2050, Abschätzung des THG-Vermeidungspotentials

Für die energiewirtschaftliche Bewertung der ORC-Technik in Deutschland musste zunächst geprüft werden, welche anderen Energieeffizienz-Techniken möglicherweise den Anfall von Abwärme bei Prozessen >150°C verdrängen könnten, wobei das rentable Potential ohne diese systemische Betrachtung bis 2050 auf 30 PJ nutzbare Wärme und nutzbarer Strom (10%) unterstellt wurde. Die systemische Betrachtung umfasste folgende Überlegungen:

- Die Nano-Membrantechnik wird in den kommenden 30 Jahren erhebliche Mengen an Prozesswärme von thermischen Trennverfahren einsparen, denn sie arbeitet bei Temperaturen zwischen lediglich 25°C und 100°C, und damit entfällt der entsprechende Prozess- und Abwärmeanteil.
- Bei Umstellung von Industrieöfen (z.B. zum Härten, Anlassen, Nitrieren, Brennen) von Gasfeuerung auf elektrischen Betrieb vermindern sich die Abwärmemengen infolge fehlender Rauchgase (begleitender Luftstickstoff der Brenngase entfällt).
- Andererseits mag es in manchen der Abwärme-produzierenden Branchen noch Produktionszuwachs in geringem Umfang geben (z.B. Pharmaka, Feinchemikalien, Nahrungsmittel (Export) oder Maschinen- und Anlagenbau).

Insgesamt wurde daher unterstellt, dass das rentable, bis 2050 realisierbare Abwärmepotential von 30 PJ auf 24 PJ/a zurückgeht (vgl. Tabelle 2). Dabei ist berücksichtigt, dass ein Teil der ORC-Anlagen am niedrigen Temperaturende nicht als KWK-Anlagen betrieben wird.

Tabelle 2: Realisierbare rentable Wärme- und Stromerzeugung durch ORC-Technik - mit und ohne Beachtung konkurrierender Effizienztechniken & Energieträgerwechsel 2030-2050

Jahr	ohne Berücksichtigung konkurrierender Effizienztechniken & EEV-Substitutionen		Systemische Betrachtung (eher zu erwartende Wirkungen)	
	verfügbare Wärme für Senke in PJ/ a	erzeugter Strom in PJ/ a	verfügbare Wärme für Senke in PJ/ a	erzeugter Strom in PJ/ a
2030	16,2	1,8	13,5	1,5
2040	21,6	2,4	17,1	1,9
2050	27	3,0	21,6	2,4

Quelle: eigene Berechnungen und Schätzungen IREES

Um den Beitrag der durch diese Marktdiffusion vermiedenen CO₂-Emissionen zu verdeutlichen, wurden die vermiedenen Emissionen für die Wärme- und Stromerzeugung kumuliert, um sie in den Kontext des Budget-Ansatzes für das für Deutschland insgesamt zur Verfügung stehende Emissionsbudget zu stellen¹.

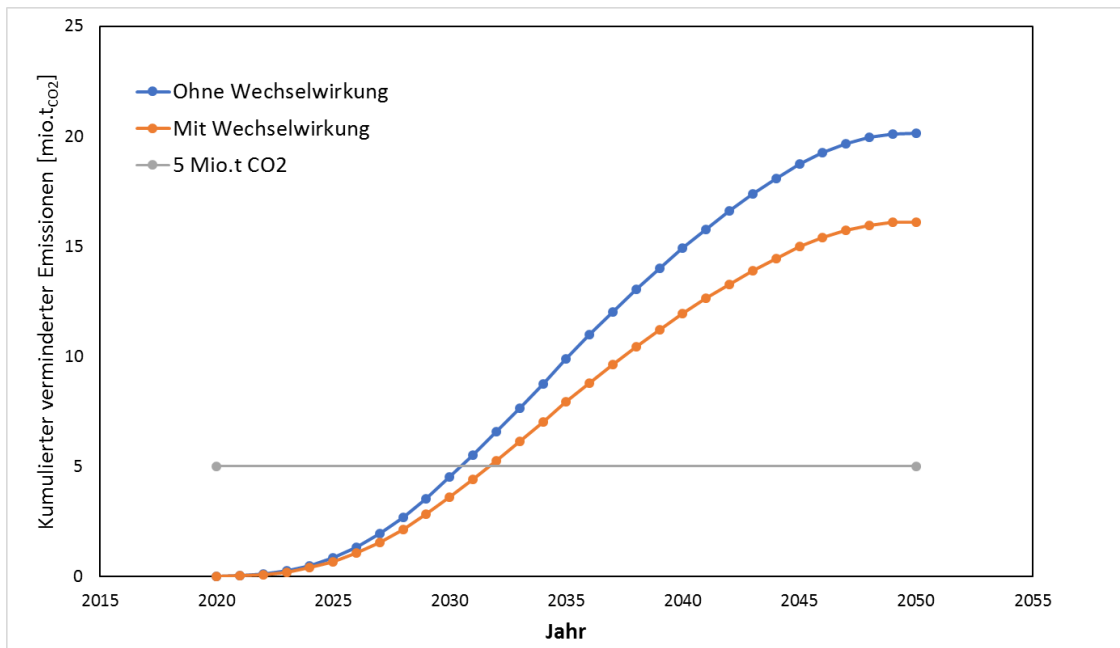
Zur Berechnung der vermiedenen CO₂-Emissionen wurden für Strom die durchschnittlichen projizierten Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes gewählt, für das vermiedene Erdgas eine allmähliche Substitution zum Wasserstoff ab 2035 und für die erneuerbaren Energien (Holzbrennstoffe, Biogas und Solarthermie) eine langsame Zunahme bis zu 7,5 % an den insgesamt genutzten Abwärmen bis 2050 - d.h., eine Verdopplung gegenüber der heutigen Nutzung. Mit diesen Annahmen errechnet sich eine kumulierte vermiedene CO₂-Menge, die bis zur Mitte der 2040er Jahre

- etwa 16 Mio. t CO₂ kumuliert beträgt (bei Berücksichtigung der oben beschriebenen Effekte mit konkurrierenden Effizienz-Techniken und anderen Wechselwirkungen - systemische Betrachtung) und
- gut 20 Mio. t CO₂ kumuliert ohne die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen.

Die ersten kumulierten 5 Mio. Tonnen vermiedener CO₂-Emissionen werden durch die ORC-Technik in den Jahren 2032 bis 2033 erreicht (vgl. Abbildung 4). Der Beitrag der ORC-Technik zur Einhaltung des Emissions-Budgets (für das 2°C-Ziel)² wäre demnach etwa 0,22 %.

¹ Hier mit 7,4 Mrd. Tonnen CO₂equ.angenommen; dies entspricht einer 2°C-Temperaturerhöhung bis 2050 bei einer Wahrscheinlichkeit von 75 % (Tech-for-Future, 2021)

² Das Budget für Deutschland zum 1,5°C wurde bereits im Sommer 2021 überschritten (Tech-for-Future, 2021).



Quelle: IREES, eigene Annahmen und Berechnungen

Abbildung 4: kumulierte vermiedene CO₂-Emissionen durch ORC-Technik 2030 - 2050 - mit und ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Aufgrund der Dekarbonisierung von Energieversorgung und industrieller Produktion sieht man auch, dass die CO₂-mindernde Wirkung der ORC-Technik zunehmend geringer wird, obwohl ihre Marktdurchdringung sich linear bis 2050 fortsetzt; entscheidend wird dann die Energieeffizienz und damit die Höhe der Energiekosten der jeweiligen Unternehmen sein.

Fazit

Wenn mit allen Anwendungen in den kommenden 10 bis 15 Jahren ein technisch-wirtschaftliches Potential von etwa 20 PJ/a industrieller Abwärme sowie biogas- und geothermischer (Ab-)Wärme in Deutschland durch die ORC-Technik genutzt würde, so läge die Anlagenanzahl bei etwa 600 bis 700, d.h. bei etwa 50 investierten Anlagen pro Jahr. Dies wäre wahrscheinlich eine zu geringe Zahl angesichts der sehr unterschiedlichen elektrischen Leistungen und Maschinentypen, um zu der erforderlichen Degression der Investitionssumme von etwa 1.000 €/kW_{el} zu kommen.

Insofern stellt sich die Frage nach ausländischen Märkten für ORC-Anlagen, insbesondere in Industrie- und Schwellenländern mit Grundstoffproduktionen, häufigen Biogas-BHKW- sowie geothermischer Anwendungen und ihren Förder-Regimen dieser Technik sowie nach der Zahl der ORC-Anlagen-Anbieter weltweit.

Da Abwärme eine CO₂-neutrale Wärmequelle ist und die KWK-Anlagen mit einem Wirkungsgrad der Stromerzeugung von durchschnittlich 10 % bei einem Gesamtwirkungsgrad von gut 80 % eingeschätzt werden können, ergibt sich bei der Annahme, dass - sehr konservativ angenommen - die Hälfte als Nicht-KWK betrieben wird, ein Potential für die CO₂-Minderung von gut 1 Mio. t CO₂ pro Jahr in der deutschen Wirtschaft (vgl. Steigung der kumulierten vermiedenen CO₂-Emissionen in Abbildung 4). Hinzu kommen Anwendungen im Bereich der Geothermie und der Biogas-/ Deponiegas-/ Klärschlammgas-BHKW-Nutzung oder ähnlicher BHKW-Anwendungen mit hohen Jahresnutzungsstunden in Nichtwohngebäuden.

Die Investitionen lägen zur Realisierung dieses Potentials bei rd. 300 Mio. €, wenn man unterstellt, dass durch diese Marktentwicklung die spezifische Investitionssumme 1.100 €/kW_{el} zugrunde gelegt werden kann.

Dies führt zu der Frage, ob nicht auch bei dieser Effizienz-Technik - ähnlich wie bei der Photovoltaik oder der Windenergie - zunächst erhöhte Investitionszuschüsse oder Stromvergütungen zur Erzielung von Skaleneffekten realisiert werden sollten, um dieses Potential dann rentabel nutzen zu können. Zudem wäre es eine neue Export-Technik - oft mit produktbegleitenden Dienstleistungen wie Planung und Contracting - für viele Industrie- und Schwellenländer.

Ohne Zweifel wird aber auch die CO₂-Abgabe auf fossile Brennstoffe (BEHG) sowie steigende Preistendenzen beim ETS-System die Abwärme-Nutzung in Industrie und Gewerbe rentabler machen. Denn schon Mitte 2021 erreichte der Preis für ETS-Zertifikate das Niveau von 55.- €/t CO₂, was bei der CO₂-Abgabe erst für 2026 lt. aktueller Gesetzeslage (BEHG) angestrebt wird (Umweltbundesamt 2021).

4. Technikzyklus-Analyse

In der Innovationsforschung versucht man jede neue Technik, die noch nicht in der allgemeinen Marktdiffusion angelangt ist, nach ihrem Entwicklungsstand zu beurteilen. Dazu entwickelten Mayer-Krahmer & Dreher (2004) das Konzept des Technikzyklus mit sechs Phasen; oft wird auch das alternative Konzept der Technology-Readiness-Levels (der Technikreife-Grad) mit neun Abstufungen verwendet.

Zur Bestimmung der Position einer neuen Effizienz-Technik - wie hier der ORC-Technik - werden meist Patent- und bibliometrische Analysen durchgeführt, die gemäß der EDuAR&D-Methode wesentliche Informationen für die Positionsbestimmung einer neuen Technik ermöglichen (Jochem et al. 2009). Zunächst werden daher die Ergebnisse der Patent- und bibliometrischen Analysen zusammengefasst.

4.1. Patent- und bibliometrische Analysen zur ORC-Technik

Die ORC-Technik wurde per Stichwort in den internationalen Patentklassen von vier Gruppen von Arbeitsmaschinen nach transnationalen Patentanmeldungen gesucht. Denn die Arbeitsmaschine von ORC-Anlagen kann verschiedene technische Ausprägungen haben.

Tabelle 3: Anzahl der international angemeldeten Patente zu vier Arbeitsmaschinengruppen von ORC-Anlagen für den Zeitraum 2009 bis 2016

Suchlauf	Suchalgorithmus	Anzahl der gefundenen Patente
F01B	Kraft- und Arbeitsmaschinen oder Kraftmaschinen allgemein oder mit Verdrängerwirkung, z.B. Dampfkraftmaschinen	8
F01C	Rotationskolben- oder Schwenkkolbenmaschinen, Rotationskolben- oder Schwenkkolbenkraftmaschinen	12
F01D	Strömungsmaschinen [Kraft- und Arbeitsmaschinen oder Kraftmaschinen], z.B. Dampfturbinen	76
F01K	Dampfkraftanlagen; Dampfspeicher; Kraftanlagen	267

Quelle: IREES und Schmoch, 2020

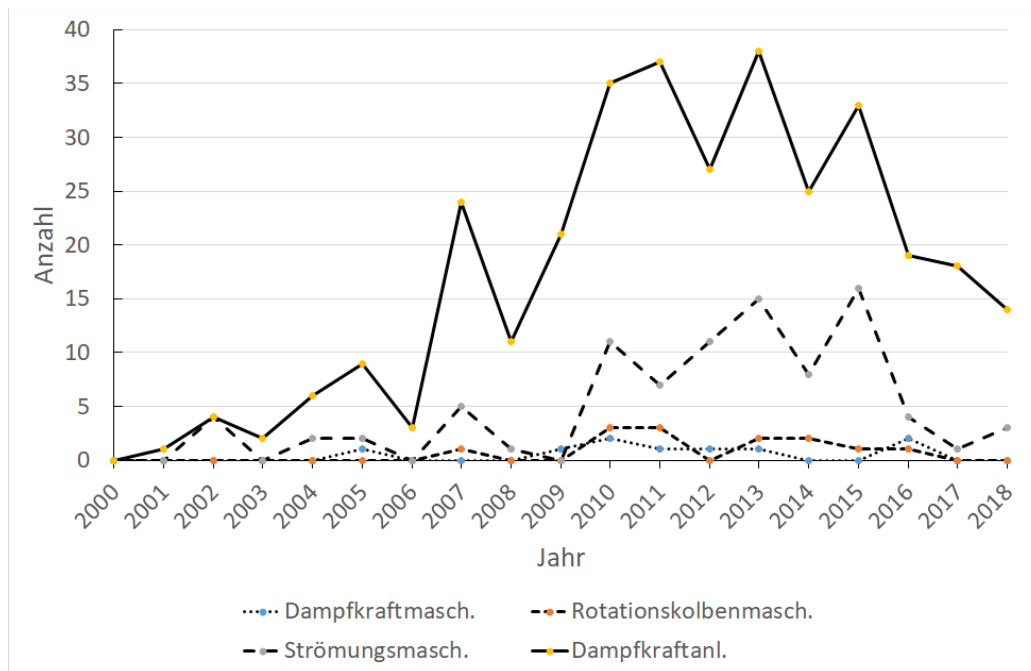
Die meisten Patentanmeldungen erfolgten in der Klasse F01K (Dampfkraftanlagen, Dampfspeicher, Kraftanlagen) mit 267 Anmeldungen zwischen 2000 und 2018 (vgl. Tabelle 3).

Der zeitliche Verlauf weist auf einen deutlichen Boom zwischen 2009 und 2016 hin (vgl. Abbildung 5); was ein erster Hinweis auf die euphorische Phase oder die Phase hoher Anwendungs-Patente (Neuorientierungsphase) sein könnte, in der sich die ORC-Technik in der bezeichneten Zeitperiode befand. Eine geringere, zweite Rolle spielen die Strömungsmaschinen (F01D), die zeitlich der gleichen Dynamik folgen wie die Gruppe der Dampfkraftanlagen (F01K). Bei den beiden anderen Arbeitsmaschinen (F01B und F01C) liegen die Patentanmeldungen pro Jahr zwischen Null und maximal 3 sehr gering.

Für zwei der bedeutsameren der vier Unterklassen (F01C und F01K) wurde dann eine Analyse für den Boom-Zeitraum 2009 bis 2018 zur Identifizierung der Länderrangfolge der Anmelder und der Anmelder-Rangfolge (Unternehmen bzw. Forschungseinrichtungen) durchgeführt.

Für den Zeitraum 2009 bis 2018 ergibt sich eine Länderrangfolge für die Patente mit Platz 1 für Deutschland und USA auf Platz 2, die aber speziell für Deutschland bei der Analyse der internationalen Publikationen nicht mehr zu finden ist (siehe unten). Denn während die USA

und Italien sich in der Spitzengruppe in beiden Bewertungsaspekten (Patentanmeldungen und Publikationen) befinden, fällt Deutschland von Platz 1 auf Platz 6 zurück (vgl. Tabelle 4).



Quelle: WPI, eigene Recherchen

Abbildung 5. Transnationale Patentanmeldungen zu ORC-Anlagen in vier verschiedenen Patentunterklassen, 2000 bis 2018

Noch dramatischer ist der Rückfall der Häufigkeit der Institutionen, aus denen die Autoren der internationalen Publikationen kommen:

- Auf Platz 1 bis 6 liegen 5 chinesische Universitäten und die chinesische Akademie der Wissenschaften.
- Platz 7 bis 15 belegen Universitäten und Firmen aus Kanada, Iran, Italien, Großbritannien, Iran, China, Dänemark, Belgien und Griechenland.
- Erst an 28. Stelle kommt die Universität Bayreuth, an 30. Stelle die TU München und an 42. Stelle die RWTH Aachen.

Tabelle 4: Länderrangfolge für ORC-Patentanmeldungen (2009-2018) und Anzahl der Internationalen Publikationen (2010 bis 2019)

Patentanalyse (transnationale Patente)		Bibliometrische Analyse (Nationalität des 1. Autors)	
Land	Anzahl	Land	Anzahl
Deutschland	84	China	1.110
USA	66	Italien	395
Italien	40	USA	319
Saudi-Arabien	17	Großbritannien	304
China	17	Iran	269
Schweden	13	Deutschland	174
Großbritannien	9	Süd-Korea	133

Quellen: WPI und WoS, eigene Recherchen

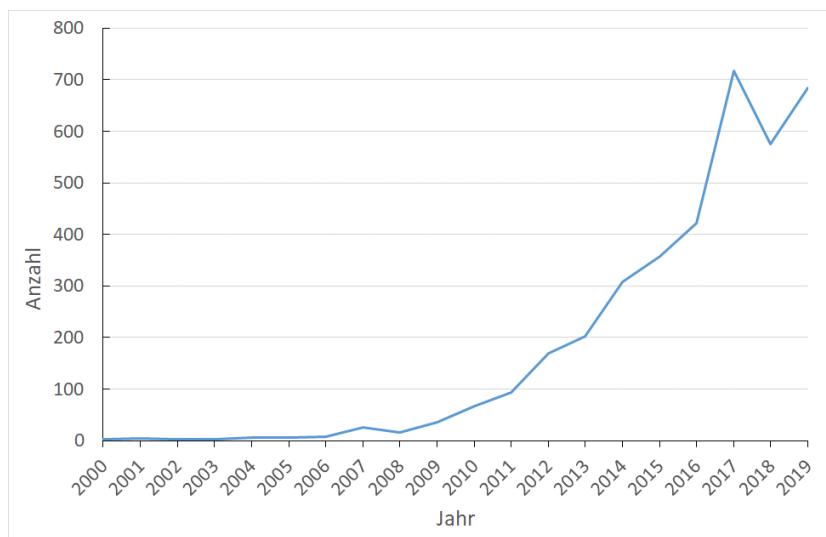
Da die Publikationen zu einer neuen technischen Entwicklung den Patentanmeldungen zum Teil vorausgehen, ist dieses Ergebnis - wie auch bei den Mitteltemperatur-Wärmeübertragern

Jochem u.a. 2021) - bedenkenswert und veranlasste die Autoren, bei den deutschen Universitäten und ORC-Anlagen-Herstellern nach den Gründen dieser Entwicklungen und Ungleichgewichte zu fragen.

Bei den Patentanmeldern dominieren folgende Unternehmen (Anzahl der Patente jeweils in Klammern): General Electric (23), Orcan Energy AG (20), Orcan Energy GmbH (18), Aramco Services (17), Saudi Arabian Oil Co. (17), Siemens AG (15), Turboden SPA (13), Turboden SRL (11) und Bosch GmbH (8).

Publikationsanalyse zur ORC-Technik

Die Publikationsanalyse wurde mit den Stichworten Organic Rankine Cycle unter Ausschluss von Flugzeugen und Luftfahrt (airplane, aircraft oder aviation) in der Datenbank Web of Science durchgeführt. Das Ergebnis zeigt einen enormen Anstieg der jährlichen Publikationen zur ORC-Technik zwischen 2008 und 2017, um seitdem auf dem hohen Niveau von ca. 650 Publikationen pro Jahr zu stagnieren (vgl. Abbildung 6).



Quelle: WoS, eigene Recherchen

Abbildung 6: Jährliche internationale Publikationen zur ORC-Technik, 2000 bis 2019

Gewiss haben diese rein quantitativen Analysen noch keine eindeutige Aussagekraft, da letztlich die inhaltliche Analyse der Hauptpatente und der Schlüsseleröffnungen mit zentralen Erkenntnissen das Bild abrunden würden. Aber es stimmt nachdenklich, wenn auf den ersten sechs Plätzen der quantitativen Auswertungen nur chinesische Forscher stehen (mit einer durchschnittlichen Anzahl der Publikationen von 115) und deutsche Exzellenz-Universitäten auf Platz 30 (TU München mit 27 Publikationen) und auf Platz 42 (RWTH Aachen mit 22 Publikationen).

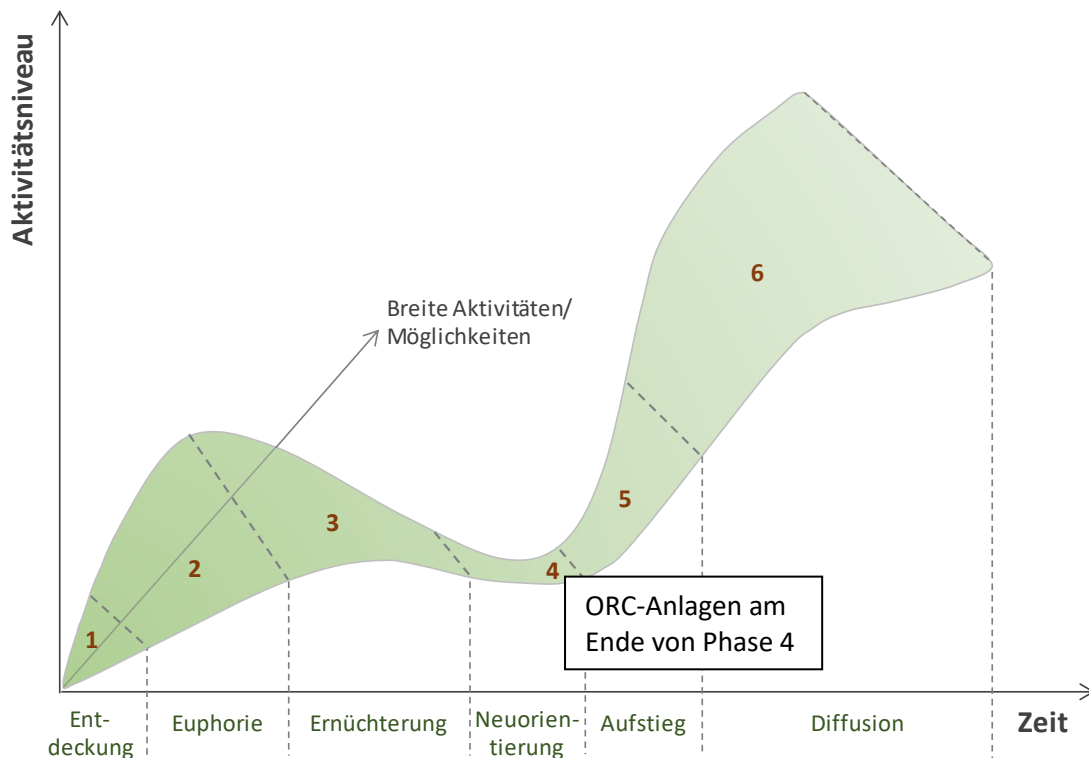
4.2. Die Position der ORC-Technik im Technikzyklus

Die ORC-Technik ist aufgrund der o.g. Erkenntnisse am Ende der Neu-Orientierungsphase angelangt (vgl. Phase 4 in Abbildung 7). Die technischen Wettbewerber (zahlreich in Form von Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung für betriebsinterne und -externe Wärmebedarfszwecke oder Prozess-Substitutionen wie bei den thermischen Trennverfahren; vgl. Haltenort/Jochem 2021) sind klar umrissen und machen bei den heutigen Rahmenbedingungen (vgl.

Abschnitt 7) eine Investitionssumme für mittlere Anlagen auf etwa 1.200 €/ kW_{el} erforderlich. Diese Kostendegression dürfte erreichbar sein, wenn

- geeignete Nischenmärkte mit relativ hohen Strompreisen und innovativen (eventuell auch bewusst auf Nachhaltigkeit achtende) Anwendern mit Anlagengrößen in einem weiten Leistungsbereich zwischen 20 bis mehr als 200 kW_{el} erschlossen werden,
- Contractoren, insbesondere aus dem Fern- und Nahwärmebereich, die ORC-Technik im KWK-Modus anwenden und anschließend die Wärme vermarkten können,
- im In- und Ausland sich bietende Anwendungen der ORC-Technik im Nicht-KWK-Modus realisiert werden, einschließlich der Verstromung geothermisch und solarthermisch gewonnener Wärme.

Ein weiterer entscheidender Faktor ist die CO₂-Abgabe (BEHG) auf fossile Energieträger (bis 2026 vermutlich auf 65 € je Tonne steigend), hier insbesondere das Erdgas, sowie auf die am ETS-System beteiligten Prozesse und Technikbereiche, wo derzeit (2021) die Zertifikatspreise zwischen 50 und 80 €/ t CO₂ liegen.



Quelle: Mayer-Krahmer & Dreher 2004

Abbildung 7: Der Technikzyklus und seine sechs verschiedenen Phasen mit ORC-Technik am Ende von Phase 4

Eine weitere Strategie der Kostenreduktion könnte ein modulares Serienkonzept sein, d.h. der Bau eines Basismodells (z.B. 50 kW_{el} per Modul), das bei höheren erforderlichen Leistungen durch Vervielfachung der Basismodule zu einer entsprechenden Anlage verwendet wird und damit höhere Stückzahlen erzielt werden können.

Für den sicheren Einstieg in ausgewählte Nischenmärkte oder den Ausbau von ersten kleinen Nischenmärkten, wie z.B. derzeit die Biogas-BHKWs (Phase 5) wären - neben dem Kosten-Degressionsziel - weitere Maßnahmen zu prüfen und seitens des Innovationssystems umzusetzen (vgl. auch Abschnitt 5 und 8):

- Kooperationen zwischen den Herstellern von ORC-Anlagen mit Herstellern von BHKWs, Industrieöfen oder weiteren Industrieanlagen mit Produktionstemperaturen über 150°C,
- eine Spezialisierung der Hersteller von ORC-Anlagen - neben der bereits erfolgten Spezialisierung auf Maschinentypen - für bestimmte Leistungsklassen und Anwendungen sowie eventuell eine Kombination mit Contracting- oder Split-Savings-Angeboten,
- eine Kommunikation über die Fachverbände der betroffenen Anwender-Branchen und der Fortbildung von interessierten beratenden Ingenieuren von erheblicher Bedeutung,
- eine auf die Nischenmärkte eingerichtete Kommunikation über geeignete Fachzeitschriften (auch der in Frage kommenden Contractor-Zielgruppen).

4.3. ORC-Anlagen < 20 kW_{el} - eine ungeklärte Wettbewerbssituation zu den thermo-elektrischen Generatoren

Anlagen unter 20 kW_{el} sind i.a. noch in der Phase der Neu-Orientierung, denn aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind sie oft noch nicht wettbewerbsfähig. Hier bedarf es auch der weiteren technischen Entwicklung, bevor über Erstanwender-Märkte (z.B. kleinere BHKW-Anlagen) die erforderlichen Kostendegressionen bei der Investitionssumme erreicht werden könnten.

Erste Nischenmärkte für diese relativ geringen Leistungen wären Abwärmeströme von < 300 MW_{th} mit möglichst hohen Temperaturen, wie sie bei Gießerei-Öfen oder der Glas-, Keramik- und Ziegel-Herstellung oder bei größeren Pulverlackier-Öfen anzutreffen sind. Das Innovations-Problem scheint hier zu sein, dass die Ofenhersteller die ORC-Technik nicht in ihre Anlagen miteinplanen, weil auch die nachfragenden Anwenderunternehmen von dieser Option keine Kenntnis haben, verunsichert sind ("wir machen den Strom nicht selbst") oder sich bewusst mit ihrem Kapital auf ihre Kernkompetenz konzentrieren wollen.

Da zur Positionierung speziell der kleinen ORC-Anlagen (<20 kW_{el}) im Technik-Zyklus die Patent- und bibliometrische Analyse im Rahmen dieser Untersuchung nicht erfolgen konnte, fußt die hier erläuterte Positionierung der kleinen ORC-Anlagen auf Ergebnissen von Fachgesprächen.

Im kleinen Leistungsbereich könnten grundsätzlich die Thermoelektrischen Generatoren (TEG) ein technischer Wettbewerber werden. Denn TEG haben den Vorteil, dass sie

- in Modulen zu sehr kleinen Leistungen (von z.B. 1 kW) gebaut werden können und dadurch über die Großserienfertigung doch eine Chance haben, mit technischen Wettbewerbern kostenseitig gleichziehen zu können (Reitze et al. 2021);
- im Vergleich zu der ORC-Technik wegen der unbewegten Teile geringere Betriebs- und Instandhaltungskosten haben und daher einen Teil der höheren Kapitalkosten (bei derzeit jedoch sehr hohen Investitionssummen der TEG von 5.000 €/kW_{el}) kompensieren könnten.

Die TEG-Hersteller streben in mittelfristiger Perspektive spezifische Investitionen für TEG von etwa 2.500 €/kW_{el} an, welche durch automatisierte Produktionsverfahren und innovative effizientere Materialien erreichbar erscheinen (Mintus et al. 2018).

5. Innovationssystemanalyse

Das Innovationssystem (Carlsson/ Stankiewicz 1991) der ORC-Anlagen-Technik schien vor knapp 10 Jahren in einer guten Entwicklung vor dem unmittelbarem Eintritt in viele Erstanwender-Märkte in Deutschland, aber auch in den OECD-Staaten, zu sein:

- die *Forschung und Entwicklung* wurde durch das Energieforschungsprogramm vorangetrieben; die Forschungsprojekte hatten im Projektteam angewandte Forschung, Hersteller- und potentielle Anwender-Unternehmen im Konsortium (vgl. Vorbemerkungen);
- es gab eine Reihe von Pilot- und ersten kommerziellen Anlagen (vgl. Tabelle 1);
- in gewissem Umfang war *venture capital* vorhanden oder große Konzerne nahmen die Technologie in ihr Produktionsprogramm auf (Bosch, Siemens, General Electric);
- es gab einen Strauß von *Hersteller-Unternehmen*, was den Ideen- und Kostenwettbewerb beförderte; es gründete sich auch ein ORC-Hersteller-Verband in Deutschland.

Es schien Mitte der 2010er Jahre auf eine erfolgreiche Diffusion der ORC-Technik in Phase 5 und dann Phase 6 des Technikzyklus hinauszulaufen, zumal man folgende Rahmenbedingungen erwartete:

- die Energiepreise steigen langsam, ebenso die Preise der Emissions-zertifikate;
- da die Abwärme CO₂-neutral ist, ging man davon aus, dass die Bundesregierung diese CO₂-freie Energiequelle entdecken und fördern würde - vielleicht sogar als Bedingung von Energiesteuer-Entlastungen oder freien Zertifikat-Zuteilungen (Abwärmennutzungsverordnung).

Doch die Erwartungen wurden - speziell in Deutschland - nicht erfüllt:

- die Preise für Erdgas waren rückläufig (zwischen 2008 und 2018 um rd. 20 %); auch die Strompreise sanken, insbesondere die Stromkosten der großen Industrieunternehmen der *Grundstoff-Industrie* (die im Grunde geeignetsten Branchen, vgl. Tabelle 5) durch günstige Käufe an der Strombörse. Die Preise für Emissionszertifikate waren bis Ende 2019 minimal (unterhalb von 10,- € je Tonne CO₂), auch weil große Kontingente frei vergeben wurden.
- Die Bundesregierung knüpfte keine konkreten Bedingungen (z.B. Nutzung der großen Abwärmeströme) an die Energie- und Stromsteuererleichterungen oder die Ausnahmen von EEG- und KWK-Umlagen bei den befreiten energieintensiven Unternehmen.
- Zudem diskriminiert die Bundesregierung die ORC-Anlagen als klimaneutrale Stromerzeugung gegenüber den erneuerbaren Energien sowohl bei der EEG-Umlage als auch bei der Förderung der Investitionen (vgl. Abschnitt 7).

Die Zahl der deutschen Hersteller schrumpfte auf heute drei in den letzten sechs Jahren (vgl. Tabelle 5). Im Ausland war die Entwicklung deutlich dynamischer: die 1980 von Prof. Mario Gaia, Polytechnikum Mailand, gegründete Fa. Turboden hat sich wesentlich besser in den Industriestaaten mit derzeit insgesamt 411 Anlagen und 42 im Bau befindlichen Anlagen etablieren können; sie wurde inzwischen von Mitsubishi Heavy Industries aufgekauft, um deren Anlagen-Portfolio zu ergänzen.

Contracting-Unternehmen, insbesondere größere Unternehmen (insbesondere der Energieversorgung), sind auch im ORC-Markt tätig, um Anlagen bei solchen Anwendern im In- und Ausland zu realisieren, die selbst weder das Kapital noch das Personal aufwenden wollen, um ihre Abwärme zu nutzen. Allerdings existiert auch hier eine Reihe von Hemmnissen (vgl. Abschnitt 7).

Stadtwerke sind in dieser Technik bis heute noch kaum aktiv, obwohl sie oftmals auch als Fernwärme- und Stromlieferant am Contracting von ORC-Anlagen ein besonderes Interesse haben könnten.

Hersteller von Industrieöfen und von hochgeeigneten BHKWs sind sich dieses zusätzlichen Aggregats als neues Geschäftsfeld zum Teil nicht bewusst oder zögern, in dieses neue Geschäftsfeld zu investieren.

Tabelle 5: Beispielhafte Auswahl zentraler Akteure im Bereich ORC-Technik in ihrem Innovationssystem

<p>Forschungsförderung und Diffusionsförderung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ BMWi Energieforschungsprogramm ▪ BAFA Investitionszuschuss-Programm ▪ DFG Forschungsförderung ▪ EU Kommission Energieforschungsprogramm ▪ KfW Kreditprogramme für Energieeffizienz-Investitionen ▪ Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) für KMU bei der AIF 	<p>Wissenschaft und angewandte Forschung (Auswahl)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fraunhofer Institut Umsicht ▪ Technische Universität München ▪ RWTH Aachen ▪ Universität Bayreuth ▪ Polytechnische Universität Mailand
<p>Hersteller von ORC-Anlagen (Auswahl)</p> <p>Konzerne, Großunternehmen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Siemens AG ▪ Bosch GmbH <p>Mittelgroße, spezialisierte Hersteller</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dürr Systems AG ▪ INTEC GMK GmbH ▪ Orcan Energy AG ▪ Turboden, Mitsubishi Heavy Industries Mailand 	<p>Intermediäre</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Normung durch DIN und VDI-Richtlinien ▪ Contracting-Unternehmen ▪ z.B. Uniper, Avacon Natur GmbH, IGATEC GmbH ▪ Venture Capital Unternehmen
<p>ORC-Anlagen-Anwender (Auswahl)</p> <p>Industriebranchen und branchenspezifische Anwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Chemieindustrie (insbesondere Petrochemie), Steine und Erden-Industrie, ▪ Weiterverarbeitung von Eisen, Stahl und NE-Metallen, Glas- und Keramik-Herstellung, ▪ Teile der Lebensmittelindustrie (Backen, Räuchern, Textilveredlungsindustrie (Färben von Kunstfaserware), ▪ thermische Nachverbrennung in vielen Branchen, ▪ Metalloberflächenbehandlung (Nitrieren, Pulverlackierung, Härten, Anlassen), ▪ Biogas-BHKWs, Geothermie-Nutzung vor der Fernwärmeverteilung, etc. 	

Quelle: eigene Darstellung

Dementsprechend sind Fortbildungsinstitutionen mit Fortbildungsangeboten zu diesem Thema sehr zurückhaltend, so dass Anregungen und Wissen zum Einsatz der ORC-Technik bei beratenden Ingenieuren und Energiemanagern sehr gering sind.

Fazit: Das Innovationssystem ist auf die neue Technik der Verstromung von Abwärme derzeit nicht hinreichend vorbereitet, nicht hinreichend aktiv und seitens der finanziellen Rahmenbedingungen verzögert die Energiepolitik selbst die Marktdiffusion dieser Technik. Auch sind positive Rahmenbedingungen der Energie- und Klimapolitik zur Förderung der

ORC-Technik als CO₂-freie Stromerzeugung und zur Realisierung von Skaleneffekten in Deutschland kaum vorhanden.

6. Ableitung möglicher Forschungs- und Entwicklungsziele (technisch und ökonomisch)

In einigen anderen OECD-Ländern sind die FuE-Aktivitäten von öffentlicher und Industrieforschung intensiver als in Deutschland; daher kommen manche FuE-Ideen sowie Geschäftskonzepte aus dem Ausland. Möglicherweise hat die ORC-Technik in Deutschland deshalb eine geringe Aufmerksamkeit, weil ihr elektrischer Wirkungsgrad mit ca. 10 % relativ gering ist; dabei wird die Tatsache nicht hinreichend gewürdigt, dass es bei Abwärmeströmen in Industrie und Gewerbe mit Temperaturen über 100°C um **die rentable Nutzung von einem Exergie-Anteil** geht, der ohne die ORC-Technik vernichtet werden würde.

Oft sind die Hersteller eher mittelständische Unternehmen, die, sofern sie FuE betreiben wollen, finanziell schnell an ihren Grenzen operieren müssen. Denn FuE-Projekte im Bereich der ORC-Systeme können schnell 3 bis 5 Mio. € an Kosten erfordern (z.B. ein ORC-Anlagen-System, das in Gießereien bei Kupol- oder Schmelz-Öfen eingesetzt werden kann). Derartige FuE-Projekte bedeuten ein Risiko, das mittlere Unternehmen oft nicht tragen können.

6.1. Produktionsprozess-Analysen - Nutzung der Exergie an geeigneten Prozess-Stufen

Viele Unternehmen kennen ihre Prozesse bzgl. Abwärmeströme nicht im Detail; dies führt dazu, dass die realen Abwärme-Potenziale (fassbaren Mengen mit ihren Temperaturen als Exergie) nicht verstanden, nicht analysiert oder gar quantifiziert und damit auch nicht ausgeschöpft werden.

Beispielsweise werden Abwärmemengen und Temperaturen nach dem Tuchfilter von Kupolöfen mit 100°C genannt, anstatt der ca. 700°C nach dem Ofen und 750°C nach der thermischen Nachverbrennung der Kupolöfen-Abgase (vgl. Abbildung 8).

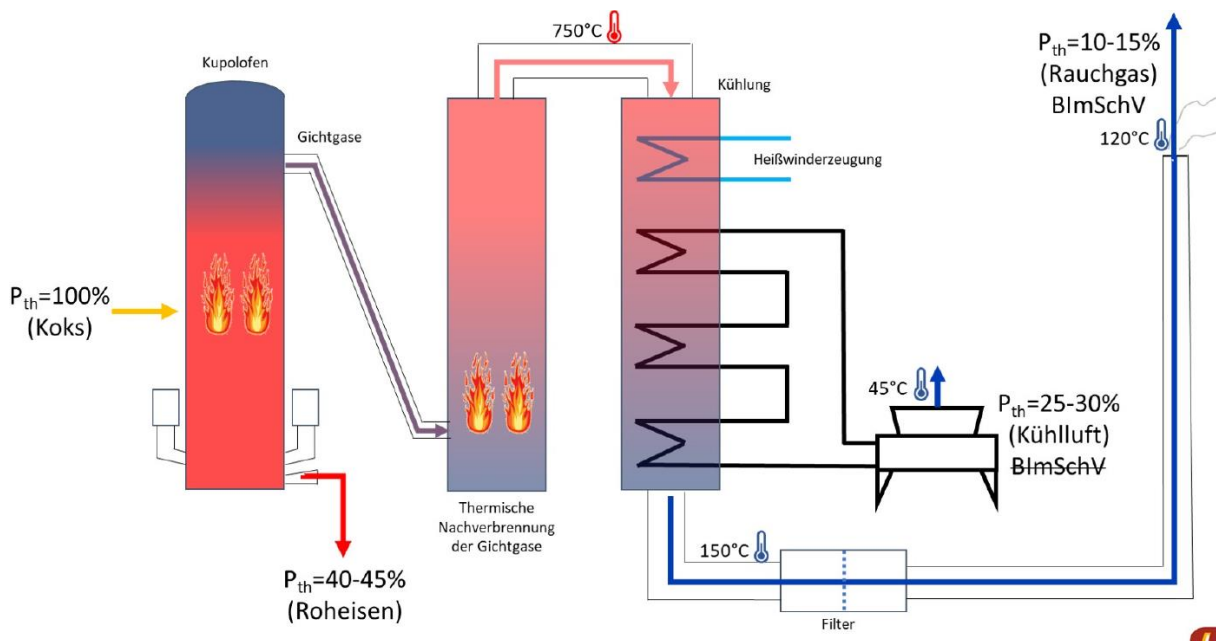


Abbildung 8: Beispiel der Benennung von Abwärmeströmen eines Industriebetriebes (hier eines Kupol-Ofens einer Gießerei)

Aufgrund dieser Situation und Unsicherheiten wird folgendes vorgeschlagen:

- Für energieintensive Prozesse mit großen Abwärmeleistungen sollte stets die jeweils gesamte Strecke der Abwärmeströme erhoben, typisiert und veröffentlicht werden mit Hinweisen, welche Abwärme-Übertrager und Abwärmenutzungs-Techniken (darunter auch ORC-Anlagen) an welchem Prozess-Schritt geeignet sein können. Hierzu liegen teilweise hinreichend präzise Erhebungsergebnisse vor (z.B. König u.a. 2019), teilweise müssten sie noch erhoben werden.
- Elektrofilter zur Reinigung von Abgasströmen sind heute immer negativ gepolt und deren Einsatz auf etwa 500°C begrenzt. Durch positive Polung des Elektrofilters könnte die Abgas-Temperatur um 200 bis 300°C erhöht werden (Schmoch 2022 pers. Mitteilung).

6.2. Abwärme-Nachbehandlung/ -übertragung - korrosionsfrei, fouling-resistent, kostengünstig

Wärmeübertrager werden häufig ohne neue FuE-Ideen bewertet, wenngleich hier deutlicher FuE-Bedarf besteht: diese sind u.a.

- kostengünstigere/ länger haltende, säurebeständige Wärmeübertrager (Wüt) (Edelstahl, Tantal, Glas, Beschichtungen) für Temperaturen zwischen 150 und 600°C, die möglichst auch gegen Fouling gut gewappnet sind.
- Staubabscheidende Wüt bzw. Staubabscheidung von hochtemperaturigen Ofenabgasen in Vorkammern (mit möglichst wenig Wärmeverlust, aber eventuell Wärmrückgewinnung),
- Reinigungssysteme für verschiedene Wärmetauscher-Bauarten, die effizient und mit geringem Zeitaufwand arbeiten,
- Modulare Mitteltemperatur-Wärmeübertrager, um leistungsunabhängig in größere Serien zu kommen (z.B. bei geschweißten Platten-Wärmetauschern).

Die Mitteltemperatur-Wärmetauscher (zwischen 100 und 500°C) haben seit etwa 2003 einen sehr dynamischen Trend sowohl bei den Patenten als auch bei Veröffentlichungen (vgl. spezielles Statuspapier zu diesen Wärmeübertragern; Reitze/Jochem 2020).

6.3. ORC-Arbeitsmaschinen und -Anlagen

Bei den ORC-Anlagen selbst geht es bei den FuE-Arbeiten um:

- Weiterentwicklung von Anlagen kleinerer elektrischer Leistung (vgl. Abbildung 9), die wegen ihrer möglichen häufigen Anwendung ein Senkungs-Potential der Investitionssumme durch Skaleneffekte haben;
- Arbeitsmittel mit hoher thermischer Stabilität und geringerem Treibhausgaseneffekt,
- Erforschung der Möglichkeiten von überkritischen Betriebsweisen und die entsprechenden Anforderungen an geeignete Wärmeübertrager und Expansions-Maschinen,
- Aufnahme von empirisch gemessenen Betriebsdaten von laufenden ORC-Anlagen und ihren Komponenten zum Aufbau von Simulationsmodellen für optimale Auslegungen verschiedener Systeme.

Im Folgenden seien diese Themen kurz skizziert:

- Wirkungsgradsteigerung im Kennfeld (nicht nur ein einzelner Betriebspunkt) durch konstruktive und auslegungstechnische sowie steuerungs-/regelungstechnische Entwicklungen,
- Design von Wärmetauschern für überkritische Zustände und geeignete Entspannungsmaschinen, z. B. überkritische CO₂-Zyklen für hohe Quelltemperaturen mit entsprechenden technischen Herausforderungen³.
- Hierzu Optimierungs-Simulationen für verschiedene Systemformate wie z.B. einstufig-unterkritisch, zweistufig-unterkritisch oder einstufig-überkritisch, für verschiedene Arbeitsmittel bei insgesamt gleichen Wärmeübertrager-Flächen (z.B. untersucht von G. Durakovic/ M. Nikolaisen 2019 für eine Wärmequelle zwischen 150 und 200°C).

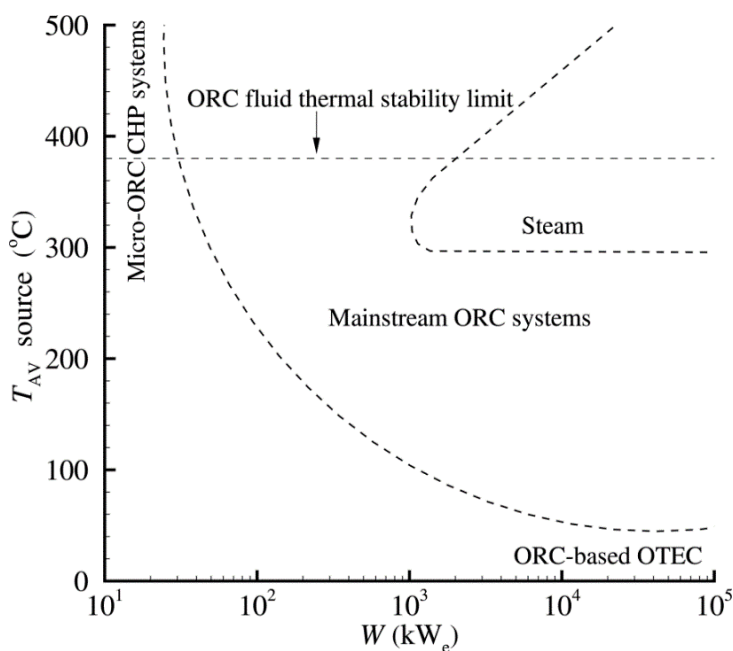


Abbildung 9: FuE-Bereich im Wärmequell-Temperatur-/elektr. Leistungs-Diagramm

- Entwicklung umweltverträglicher und thermisch stabiler Arbeitsmedien und Fluid-Mischungen davon (gemeinsam mit der chemischen Industrie für geeignete Temperaturniveaus), je nach Anwendungsbedingungen, etc.
- Kopplung mit Absorptions-Kälteanlagen (als KWK-Ausführung) für Branchen, die neben der anfallenden Abwärme auch einen merklichen Kältebedarf haben, den sie derzeit meist mit Kompressionsanlagen bedienen.
- Ölfreie Kolbenmotoren (keine Trennung zwischen Kälte- (ORC-) und Schmiermittel), kompakter, deutliche Kostensenkung, höhere Wirtschaftlichkeit, besserer Marktzugang, variables Totvolumen für stark schwankende Wärmeströme zur optimierten und im Jahresmittel steigenden Effizienz,
- Schmiermittelfreie Dicht- und Gleit- Materialien bis 400°C (500°C) (z. B. für Kolbendichtungen).

³ <http://sco2symposium.com/www2/sco2/default.htm>

Es ist auch zu prüfen, ob es zurzeit schnelle Prüfverfahren (Quick check) für Energiemanager und beratende Ingenieure gibt, die es ermöglichen, mit wenigen Daten zur Eingangstemperatur, Abwärmemengen und ungefähren Jahresnutzungsstunden innerhalb von etwa einer halben Stunde entscheiden zu können, ob die nähere Betrachtung zum Einsatz einer ORC-Anlage sinnvoll ist oder eher nicht.

6.4. Wärmetechnische und elektrische Einbindung von ORC-Anlagen

Oft sind die Integrationskosten (Planungskosten, Rohrleitungsbau, Wärmeübertrager, elektrische Anbindung, Statik, etc.) sehr hoch. Denn jede Installation von ORC-Anlagen wird i.a. neu im Sinne eines „einmaligen Anlagenbaus“ angegangen; die hohen Integrationskosten verhindern häufig die Rentabilität. Daher der Vorschlag:

- Durchführung von anwendungsspezifischen Entwicklungsprojekten - vielleicht auch als Reallabore - für energieintensive Prozesse der Grundstoff-Industrie (z.B. für die Anbindung in Raffinerien, belastetes Abgas von Kupolöfen oder Glasschmelzen vor dem Filter, etc.).
- Für die thermische Einbindung werden prozess-spezifische Lösungen als Standard-Empfehlung erforderlich; diese erleichtern eine (Klein-)Serienfertigung und standardisierte Einbindungen.
- Für die elektrische Einbindung von ORC-Anlagen in die Mittelspannungsebene gibt es eine Reihe von Vorschriften, zu deren Erfüllung aber eine standardisierte (kostengünstige) Lösung erst noch voll entwickelt werden müsste.

6.5. Speicherung

Im Umfeld der Wärmespeicher (zwischen 150 und 500°C) wird bei den Latentwärmespeichern verstärkt geforscht (auch infolge der solarthermischen Kollektoranlagen und der Tiefen-Geothermie. Die Speicher sind im industriellen Abwärmebereich für die Vergleichsmässigung von diskontinuierlichen Abwärmeströmen erforderlich (insbesondere für Turbinenanwendungen); hier sollten Speicher bis zu 50 MWh ermöglicht werden.

- Hochtemperaturspeicherung, Phasenwechsel bei hohen Temperaturen (> 300 bis 400°C) und mit hoher Energiespeicherdichte,
- modulare Speicher, variable Größen durch Modulbauweise (auch wegen (Klein-)Serienfertigung).

Wegen der Bedeutung der Latentwärmespeicher in dem Temperaturbereich zwischen 100 und 500 °C wurde auch hier vom Projektteam ein spezieller Statusbericht erarbeitet (Toro u.a. 2021).

Die Kostenreduktionsziele fokussieren sich auf eine gezielte Erhöhung der Stückzahlen und Standardisierung der Komponenten. Hierbei ließe sich auch berücksichtigen, andere als industrielle Anwendungen der ORC-Anlagen, z.B. Stromerzeugung aus Erdwärme (Tiefengeothermie) mit einem Potential von etwa 150 Anlagen mit je 5 MW_{el.} - oder kleiner bzw. mit Modultechnik zu erreichen - mit in eine Serienfertigung einzubeziehen (vgl. Frick/Kaltschmitt 2009). Auch der Blick auf die Exporte auf dem europäischen und globalen Markt einschließlich von solarthermischen Rinnenkollektoranlagen in sonnenreichen Ländern ermöglicht weitere Skaleneffekte.

Skaleneffekte bei den Kosten durch verstärkten Export von ORC-Anlagen zu erreichen, würde am ehesten bei bio- oder erdgasbetriebenen BHKWs erreicht. Behindert wird diese Strategie dadurch, dass die ORC-Anlagen derzeit noch einer Förderung bedürfen, aber praktisch jedes Land (auch in der EU) eigene Förderrichtlinien aufstellt. Das gilt z.B. in Bezug auf gesetzte Schwellen, bis zu denen oder ab denen gefördert wird, auf Förderhöhe und Förderdauer.

Auf diese Weise werden Kostendegressions-Potentiale durch Serienfertigung bei schneller Marktdiffusion denkbar; dennoch bleiben erhebliche absehbare Diffusionshemmnisse zu überwinden (vgl. Abschnitt 7 und König u.a., 2019).

Aufgrund des Potentials von bis zu 3 PJ CO₂-freier Stromerzeugung pro Jahr, das der ORC-Technik zuzurechnen ist, könnte es auch sehr aufschlussreich sein, einen Teil der bestehenden Anlagen zu analysieren in ihrem Betriebsverhalten, ihren Kosten und bzgl. der Gesamteinschätzung der jeweiligen Anlage durch den verantwortlichen Betreiber / Energiemanager.

7. Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen

Zunächst sei an *das zentrale Hemmnis aller Energieeffizienz-Investitionen* erinnert: gut 80 % der Unternehmen orientieren diese Effizienz-Investitionen an dem Risikomaß "Amortisationszeit" mit einer Erwartung des Kapitalrückflusses durch die Energiekosteneinsparungen binnen weniger als drei Jahre. Die entspricht bei Lebensdauern einer ORC-Anlage von 10 bis 15 Jahren einer internen Verzinsung von 31 bis 33 %, eine Rentabilität, die die meisten Unternehmen bei ihrer Gesamtrentabilität nur zu einem kleinen Bruchteil erreichen.

Hintergründe dieser "Gewinnverweigernden" Entscheidungsroutine sind bei Aktien- und großen Kapitalgesellschaften die kurzfristigen Arbeitsverträge des Vorstands, die kurzfristig wirksamen Boni und die kurzfristigen Gewinnerwartungen der Aktionäre bzw. Kapitaleigner. Dieses zentrale Hemmnis, das bei etwa 80 % der Unternehmen in den OECD-Staaten anzutreffen ist, wird seit Jahrzehnten kritisiert (Schröder u.a. 2009), aber seitens der Politik, der Wirtschaftsverbände und der Fortbildungseinrichtungen kaum beachtet, als handle es sich um ein Tabu. In vielen Fällen bieten auch die Hersteller von Energieeffizienz-Lösungen ihre Produkte nur mit der Amortisationszeiten-Methode an, ebenso kann man es bei beratenden Ingenieuren immer noch beobachten.

Neben diesem Zentralhemmnis gibt es die *typischen Hemmnisse einer innovativen Technik*:

- hohe spezifische Investitionen infolge sehr kleiner Serien, die die Rentabilität in Frage stellen,
- hinzu kommt, dass die hohe spezifische Investition mit entsprechend hohen Kapitalkosten von vielen Anbietern und Energiemanagern nicht mit ihren Gesamtkosten genauer bewertet wird, denn die Betriebskosten bestehen fast nur aus Wartungskosten; auch werden ORC-Anlagen oft als Optional-Position mit unzureichenden Erläuterungen zur Rentabilität angeboten. Dann werden sie oft bei begrenztem Investitionsvolumen gestrichen;
- zu wenig Kenntnisse und Erfahrungen über die neue Technik bei beratenden Ingenieuren, Installationsfirmen und Genehmigungsbehörden (die Kenntnisse sind meist sechs bis acht Jahre alt, als noch mehr ORC-Anlagen (mit geringeren Stromausbeuten) gebaut wurden, von denen zudem nicht wenige technische Anlaufprobleme hatten);
- zu wenig Kenntnisse bei den potentiellen Anwendern, so dass diese Technik nicht aktiv nachgefragt wird. Wo erste Erfahrungen vorliegen, werden sie - aus Wettbewerbsgründen - kaum kommuniziert, oder die Verbände kümmern sich zu wenig um die Knowhow-Diffusion in ihrer Branche.
- Internationale Konzerne verfolgen unterschiedliche Strategien der Investitionen von Produktionsstätten im Ausland; eine Strategie ist, dass man sich jeweils im Herstellerland an die Gegebenheiten von Energiepreisen und Umweltauflagen anpasst, d.h., man nutzt nicht die Vorteile einer konzerneinheitlichen Planung aller Produktionsstätten, sondern man nutzt die Kostenvorteile im jeweiligen Land und kommt damit zu zersplitterten Lösungen mit der Inkaufnahme nicht realisierter Skaleneffekte.
- Die Dienstleistungen von Contractoren werden häufig nicht in Anspruch genommen, weil die Investition nach internationalen Bilanzierungsregeln in die Bilanz des Anwenders eingestellt werden muss und dadurch der Anteil des Eigenkapitals verschoben wird.

Neben diesen typischen Hemmnissen für neu in den Markt eintretende Techniken gibt es *ORC-Anlagen-spezifische Hemmnisse*:

- Große Abwärmeproduzenten mit hohen Temperaturen und Abwärmemengen - und damit extrem geeignet für ORC-Anlagen - sind häufig von EEG-Umlage, Energie- und Stromsteuer befreit und auch an der Strombörse aktiv, so dass sie sehr geringe durchschnittliche Strompreise zahlen (um oder weniger als 6 bis 7 cts/kWh). Hier fehlt ein Regelwerk, dass die Befreiung von Kostenelementen beim Strom durch verstärkte Maßnahmen zur Abwärmenutzung verknüpft.
- Zusatzeinnahmen durch eine weitere Nutzung der Abwärme aus der ORC Anlage sind häufig schwer zu realisieren. Entweder muss erst noch eine Anbindung an ein Nah- oder Fernwärmenetz geschaffen werden. Oder aber der Nah-/Fernwärmenetzbetreiber scheut vor einer Zuschaltung einer oft unsteten Wärmequelle zurück.
- Die Nicht-KWK-Anlagen, die ab dem 1.8.2014 in Betrieb gingen, haben lt. eines EU-Kommissionsentscheids die vollständige EEG-Umlage zu zahlen, obwohl sie eine CO₂-freie Stromerzeugung leisten - eine widersprüchliche Regel angesichts der vergleichbaren Stromerzeugung von PV oder Windenergie. Dies bedeutete das "Aus" für neue ORC-Anlagen, soweit sie als Nicht-KWK-Anlagen konzipiert und betrieben werden konnten, d.h. für Anlagen mit Eingangstemperaturen <150°C.
- Selbst die Anlagen im KWK-Betrieb müssen für selbstgenutzten KWK-Strom 40 % der EEG-Umlage abführen. Diese Regelung gilt für alle KWK-Anlagen, die von § 61b Nr. 2 EEG erfasst werden. Eine Leistungsbeschränkung existiert nicht. Die Zahlung der 40 % der EEG-Umlage entspricht einem CO₂-Preis von rd. 50,- € / t CO₂. Diese Regelung könnte mit der neuen Bundesregierung in den Jahren 2022 oder 2023 entfallen.
- Diese Ungleichbehandlung von ORC-Anlagen und Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien zeigt sich abgeschwächt auch beim Förderprogramm der KfW: ORC-Anlagen werden mit 30 bis 40 % (KMU) der Investitionssumme gefördert, aber solarthermische Anlagen gemäß Programm 2.9.5 mit 45 bis 55 % (KMU).
- Diese als kontraproduktiv zu bezeichnende gesetzliche Regelung führt im Ergebnis dazu, dass PV- und Windenergie-Anlagen gefördert werden und ihre 40 %ige Umlagefinanzierung einen Riegel vor die Nutzung der industriellen Abwärme zur CO₂-freien Stromerzeugung schiebt.
- Die Hersteller von Industrieöfen, bei denen die ORC-Anlagen ein sinnvolles Aggregat für die Ofenabgase wären (wie der Economizer am Rauchgasausgang einer Kesselanlage), weisen das innovative Konzept von sich. Man betreibt Erhaltungsmaßnahmen und will keine systemischen neuen Ofenkonzepte. Zudem herrscht in der deutschen Industrie als heimischer Kunde derzeit große Unsicherheit wegen der fälligen Trans-formation der industriellen Produktion; so werden derzeit Investitionen in neue Öfen verschoben.
- Viele energietechnische Berater verbinden mit ORC-Anlagen die Niedertemperatur-ORC, die einen niedrigen Wirkungsgrad haben (unter 8 %) und bei denen der Großteil der Wärme über Kühler an die Umgebung abgegeben wird. Nur wenige wissen Bescheid, dass mit Hochtemperatur-ORC-Anlagen ein KWK-Betrieb möglich ist und die Kondensationswärme für eine Zweitnutzung verfügbar ist (z.B. auf 90 °C).
- Die angewandte Forschung für wissenschaftlich fundierte Neuauslegung von Wärmetauschern liegt nach Aussagen von Fachleuten zunehmend brach; es gibt zunehmend zu wenige Fachingenieure, die neue Wärmetauscher berechnen könnten. Mangelnde Kenntnisse über Korrosionsrisiken, Säuretaupunkte, Foulinggefahren etc.)

seien unübersehbar; manche Anwender seien heute oft unsicher, ob sie einen voll funktions-fähigen, effizienten und wartungsarmen Wärmetauscher geliefert bekommen.

Bei den Interviews wurde seitens der Fachleute bemängelt, dass zu wenig Verpflichtungen in der Energie- und Klimapolitik in jenen Fällen gebe, in denen energieintensive Unternehmen oder Prozesse Steuer- und Umlagen-Erleichterungen ohne klare Auflagen für Effizienz-Investitionen erhielten. Die Pflicht-Audits nach ISO 50.001 oder EMAS führten zu unverbindlichen Maßnahmen-Listen, die trotz hoher Profitabilität keine Umsetzungsverpflichtung nach sich zögen.

Es sei hier aus politikwissenschaftlicher Sicht betont, dass möglichst alle hier genannten Hemmnisse seitens der Gesetzgebung und der Selbstorganisationen der Wirtschaft simultan angegangen (Politikbündel) werden müssen, um effizient und wirksam eine zügige Diffusion der ORC-Technik in der deutschen Industrie zu realisieren. Würde man nur die ORC-spezifischen Hemmnisse beseitigen, nicht aber die zuvor genannten, würde wenig erreicht.

8. Multikriterielle Gesamtbewertung der ORC-Technik 2030 - 2050

Ergänzend zu den in Abbildung 1 dargestellten Analysen wurde eine multikriterielle Bewertung für die ORC-Technik durchgeführt. Hierfür wurde ein Satz von acht Bewertungskriterien definiert, die jeweils operationalisiert und dann je nach Kriterienausprägung mit 1 bis 5 bewertet wurden. Die Bewertungskriterien, deren jeweilige Indikatorik sowie die Bandbreiten der Bepunktung sind in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 gezeigt.

Tabelle 6: Bewertungskriterien und deren Indikatorik für die multikriterielle Bewertung

Kriterium	Dimension / Indikator / Berechnung	Quantitativ / Qualitativ
Energieeinsparpotential (Endenergie)	[PJ]	Quantitativ
THG-Minderungspotenzial (Primärenergie)	[CO2-äq.]	Quantitativ
Position im Technikzyklus	Bewertung 1-5 für TZ 2-6	Qualitativ
Rentabilität (TZ 5)	Interne Verzinsung / Barwert	Quantitativ
Investitionsrisiko (TZ 5)	Amortisationszeit	Quantitativ
Wettbewerbssituation bei Markteintritt (TZ 5)	Technisch/ökonomischer Vorteil	Qualitativ
Kostendegression/Skaleneffekt (TZ5)	Angenommene/ Ermittelte Lernkurve	Quantitativ/Qualitativ
Hemmnisse	technisch/regulatorisch/ökonom.	Qualitativ

Tabelle 7: Bewertungskriterien und Bandbreite der Bewertung für die multikriterielle Bewertung

Bewertungskriterium	Bandbreite der Bewertung
Energieeinsparpotential	1: <3PJ/a – 5: >50PJ/a
THG-Minderungspotenzial	1: <0,3 Mio. t/a – 5: >4 Mio. t/a
Position im Technikzyklus	1: Euphor. Phase – 5: Marktdiffusion
Rentabilität (TZ 4)	1: <8 % - 5: >30 %
Investitionsrisiko (TZ 4)	1: > 10 Jahre – 5: < 3 Jahre
Wettbewerbssituation bei Markteintritt (TZ 4)	1: kein t/w Vorteil – 5: sehr überlegen
Kostendegression/Skaleneffekt (TZ5)	(Lernrate) 1: <3%/a – 5: >20%/a
Hemmnisse	1: zahlreich, kaum überwindbar – 5: keine

Tabelle 8: Operationalisierung des Kriteriums "Rentabilität" für die multikriterielle Bewertung

Rentabilität: interne Verzinsung	Bewertung mit Punkten
<8% (unrentabel)	1
8-12 %	2
>12-20%	3
>20-30%	4
>30%	5

Die multikriterielle Bewertung wurde für verschiedene Stützjahre zwischen 2030 bis zum Jahr 2050 durchgeführt. Sie beruht im Wesentlichen auf Abschätzungen, die meist mit Fachleuten diskutiert wurden; dennoch ist zu unterstreichen, dass mit längerem Zeithorizont die Bewertungen als immer unsicherer einzuschätzen sind.

Während das Investitions-Risiko für die ORC-Technik sowohl für 2030 als auch 2050 als gering eingeschätzt wird, nimmt der Wettbewerb mit anderen technischen Optionen bei der Marktdurchdringung in den 2030er und 2040er Jahren zu (vgl. Abbildung 10). Die Hemmnisse bleiben relativ konstant, ebenso die Kostendegression, weil die Produktionsserien weiterhin relativ klein bleiben. Verständlicherweise geht die Bewertung der Treibhausgas-Minderung auf Null zurück, d.h. die langfristige Bedeutung der ORC-Technik ist die ermöglichte Energieeinsparung durch die Abwärmenutzung und Stromerzeugung, d.h. auch die Energiekosten- Einsparung. Die blaue Linie wäre die (größere) Energieeinsparung in 2050, wenn die Nano-Membrantechnik sich nicht bei den thermischen Trennverfahren durchsetzen würde. Denn diese Effizienz-Technik könnte die thermischen Trennverfahren ersetzen, d.h. ihre Abwärme wäre für die ORC-Technik nicht verfügbar (Haltenort/ Jochem 2021).

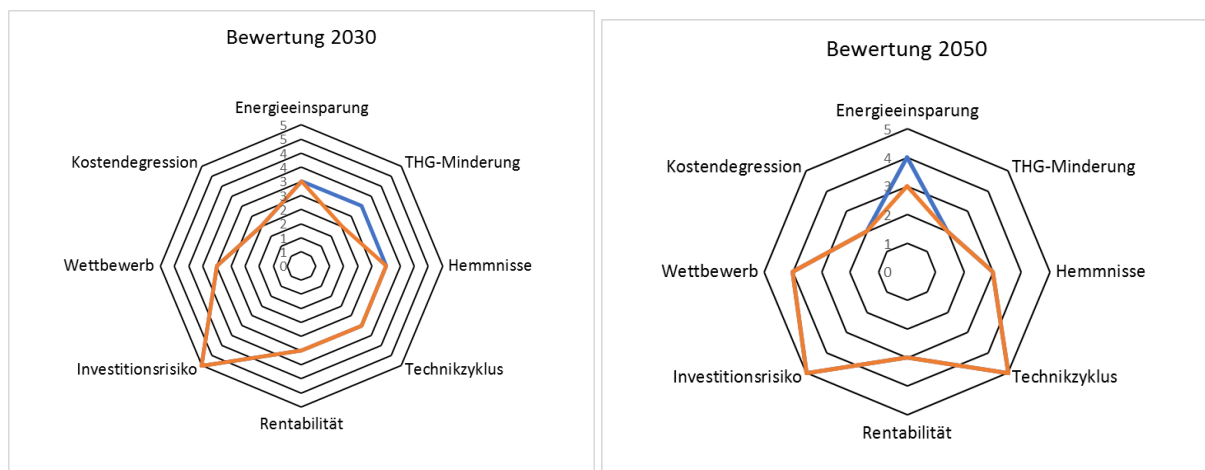


Abbildung 10: Bewertungs-Spinnen der multikriteriellen Analyse für ORC-Technik 2030 und 2050

9. Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Aufgrund der in Abschnitt 3 genannten Chancen der ORC-Technik und den in Abschnitt 7 genannten Hemmnissen kommen die Autoren zu folgenden Empfehlungen, die sich an verschiedene Akteure des Innovationssystems wenden:

EU-Kommission und Bundesregierung:

- Die in Abschnitt 6 genannten Forschungsthemen sollten von Wissenschaft und Herstellern unter Förderung seitens der EU-Kommission und/oder der Bundesregierung intensiv verfolgt werden.
- Die Bundesregierung sollte eine Regelung vorsehen, dass die volle oder teilweise Befreiung bei Energie- und Stromsteuer oder bei der EEG-Umlage an konkrete, betriebs-spezifische Auflagen an verstärkte Bemühungen zur Energieeffizienz einschließlich verstärkter Maßnahmen zur Energieeffizienz/ Abwärmenutzung verknüpft. Bei den Nicht-KMU könnten hier die Ergebnisse der Pflicht-Audits verwendet werden und die prüfenden Auditoren könnten die Einhaltung der unternehmensspezifischen Zielsetzungen kontrollieren und bestätigen. Die Ziele müssen (jährlich) eingehalten werden.
- Die Bundesregierung sollte die Stromerzeugung via ORC-Anlagen mit Nutzung CO₂-freier Abwärme genauso fördern wie die erneuerbaren Energien, was die EEG-Umlage und die Förderung der erneuerbaren Energien betrifft (BAFA- und KfW-Programme).
- Die Bundesregierung sollte für Contractoren ein Bürgschaftsmodell für Fälle unvorhersehbarer Betriebsschließungen oder Produktions-Umstellungen Abwärme-
- liefern-der Betriebe bereitstellen, das - ähnlich die die Hermesbürgschaften für Exporte - das Risiko von Contractoren begrenzt.

Fortbildungseinrichtungen, Hersteller und ihre Verbände, Fachmedien:

Da die ORC-Anlagentechnik eine bisher weitgehend unbekannte Effizienz- und Stromerzeugungstechnik ist, sind Hochschulen, Fortbildungseinrichtungen, Hersteller und Träger von Energieeffizienz-Netzwerken gefordert, folgende Aktivitäten zu entwickeln

- Erarbeitung eines Curriculums zum Thema ORC-Anlagen für die Fortbildung von beratenden Ing., Wartungsfirmen, Stadtwerken, Contractoren, Genehmigungs-Personal und Energiemanagern;
- Workshops mit Herstellern und Anwendern sowie beratenden Ingenieuren mit Hands on-Besichtigungen mit Impulsreferaten von Anwendern und Contractoren, die bereits Erfahrungen mit ORC-Anlagen haben und auf Pioniermärkte aufmerksam machen (auch in Energieeffizienz-Netzwerken als Thema eines Treffens);
- Nutzung des Curriculums für Spezial-ORC-Netzwerke ("Fokus-Energie-Netzwerke"): Laufzeit: ein Jahr, vier- bis sechsmal treffen sich sechs bis 10 Energiemanager von Anwender-Unternehmen, die bei entsprechendem Abwärmeangebot eine ORC-Anlagen-Investition erwägen;
- Spezielle Initiierungs-Workshops für Ofen- oder BHKW-Hersteller veranstalten in Anwesenheit von erfahrenen beratenden Ingenieuren und Pionier-Anwendern.
- Fachmedien für Industriebetriebe und Contractoren, Wirtschaftsverbände und IHKs sollten verstärkt über die ORC-Technik mit überzeugenden Beispielen berichten.

<https://www.clusterportal-bw.de/aktuelles/aktuelle-mitteilungen/mitteilungen-detailseite/news/bundesfoerderung-aus-und-weiterbildung-in-der-wirtschaft-40/>

Wirtschaftsverbände, deren Branchen und Prozesse für die ORC-Technik besonders geeignet sind:

Da die neue strom-erzeugende ORC-Technik auch in den Anwenderbranchen wenig bekannt ist, sollte es auch hier die Aufgabe der Wirtschaftsverbände, insbesondere derjenigen der Grundstoff-Industrie sein (vgl. auch Abbildung 6), auf diese Anwendung der ORC-Anlagen hinzuweisen; dies kann auf verschiedene Weisen erfolgen, wobei branchenspezifische Referenzanlagen sehr wichtig sind, um potentielle Anwender zu überzeugen:

- Thematisieren der ORC-Technik in den technischen Arbeitskreisen der Verbände, in ihren Newslettern und Informationsbriefen,
- Einbau in den technischen Referaten der jeweiligen Jahreskonferenzen der Wirtschaftsverbände,
- Workshops mit Herstellern und Anwendern sowie beratenden Ingenieuren mit Hands-on-Besichtigungen mit Impulsreferaten von Anwendern und Contractoren, die bereits Erfahrungen mit ORC-Anlagen haben und auf Pioniermärkte aufmerksam machen (auch in branchenspezifischen Energieeffizienz-Netzwerken als Thema eines Treffens wie z.B. der Stahl-Industrie, der NE-Metallindustrie, der chemischen Industrie, der Nahrungsmittel-Industrie oder der Fernwärmewirtschaft).

Nur wenn diese Akteursgruppe des Innovationssystems hinreichend aktiv wird, bestehen die gute Chancen einer zügigen Marktdiffusion; denn die Einführung neuer Techniken beruht zu einem erheblichen Anteil auf Vertrauen; eine hinreichende Rentabilität der ORC-Technik wird durch die CO₂-Abgaben auf fossile Brennstoffe hinreichend gegeben sein, wenn die Regierung nicht zu hohe Zugeständnisse an Ausnahmen für CO₂-Abgaben und Energiesteuern macht, ohne dafür erhebliche Anstrengungen bei der Energiekostensenkung einzufordern.

Contractoren:

Wegen der hohen Kapitalintensität und der erheblichen Knowhows für die Planung von ORC-Anlagen ist die Rolle der Contractoren sehr groß, um eine schnelle Marktdiffusion dieser Effizienz- und Stromerzeugungs-Technik erzielen zu können.

Verstärkte Lobbyarbeit der Contractoren bei Anwenderverbänden (s.o.) sowie bei der Bundesregierung (Rahmenbedingungen) und den Länderregierungen mit ihren Energie- und Klimaagenturen erscheint sinnvoll (Themen s. o.). Speziell bei Stadtwerken mit Fernwärmevertrieb und der Notwendigkeit der Decarbonisierung der Wärmeerzeugung sollte die ORC-Technik als Exergie-nutzende Option betont werden, d.h. als vorangehender, erster Schritt der Nutzung von Abwärme aus Prozessen von Industrie und Gewerbe mit höheren Temperaturen vor der Einspeisung in das Fernwärmenetz (Jensen 2018; Ziemele u.a. 2018).

Abschließend sei noch einmal betont, dass dann die größten Fortschritte einer schnellen Marktdiffusion der ORC-Technik erzielt werden können, wenn möglichst viele der hier genannten Maßnahmen seitens der verschiedenen Akteursgruppen des Innovationssystems gleichzeitig ergriffen werden.

10. Ergebniszusammenfassung für ORC-Anlagen

Die ORC-Technik ist schon seit den 1980er Jahren im Gespräch für die Nutzung von Abwärme mit Temperaturen von unterhalb etwa 550°C bis zu etwa 80°C, um den Exergiegehalt der hohen Abwärmepemperaturen für eine Stromerzeugung zu nutzen und die daraus ableitbare Wärme für andere Wärmeprozesse oder die Kälteerzeugung. Oberhalb 550°C sind konventionelle Wasserdampfkraftwerke (auch als KWK-Anlagen) aus thermodynamischen, technischen und Kosten-Gründen den ORC-Anlagen überlegen.

Von den rund 150 PJ/a Abwärme, die im Temperaturbereich zwischen 90°C und 500°C in der deutschen Industrie als technisch-wirtschaftlich nutzbar anfallen, lässt sich CO₂-freier Grundlaststrom erzeugen; in bestimmten Branchen und Prozess-Bereichen sind die Abwärmeströme prozessbedingt intermittierend und damit für die ORC-Anlagen nur mit einem entsprechenden Wärme-Speicher geeignet. Das Potential für die ORC-Anlagen-Nutzung reduziert sich durch technische Wettbewerber (z.B. direkte Nutzung der Abwärme in betriebsinternen Wärmeprozessen, Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze, bisher nicht realisierte betriebsinterne Optimierungslösungen und Prozesssubstitutionen, in Zukunft geringere Abwärmeströme bei Substitution von fossilen Brennstoffen durch Strom).

Das rentabel nutzbare Abwärmepotential wird nach Berücksichtigung der Wettbewerber mit rd. 24 PJ/a geschätzt, davon ca. 2,4 PJ/a als Strom und der Rest als nutzbare Abwärme. Die ersten 5 Mio. vermiedenen kumulierten t CO₂ werden etwa im Jahre 2033 erreicht. Die Anzahl der Anlagen läge bei etwa 600 bis 700 mit einem Invest von etwa 300 Mio. €, d.h. vielleicht bei etwa 50 in Deutschland investierten Anlagen pro Jahr. Durch Exporte in andere Industrie- und Schwellenländer mit Grundstoff-Industrien könnte die Stückzahl erhöht werden, um durch größere Serienfertigung die spezifischen Investitionen zu senken.

Bei der Patentanalyse für die ORC-Technik für die 2010er Jahre führt Deutschland die Liste der transnationalen Patente vor den USA und Italien an, aber bei der bibliometrischen Analyse liegen die deutschen Autoren von internationalen Veröffentlichungen abgeschlagen auf Platz 6 (mit 174 Publikationen) hinter dem Tabellenführer China (mit 1110 Publikationen), gefolgt von Italien, USA, Großbritannien und Iran. Die Dynamik von Patentanmeldungen und internationalen Veröffentlichungen deuten klar auf die beginnende Marktdiffusion dieser Technik hin.

Diese Marktdiffusion wurde in Deutschland durch die erheblichen Ausnahmen der Energiebesteuerung von energieintensiven Unternehmen und einer 40 %igen Beteiligung an der EEG-Umlage für ORC-Strom in erheblichem Umfang gebremst, so dass seit 2012 eine Reihe von deutschen Herstellern die Produktion von ORC-Anlagen einstellten. Heute gibt es noch drei kleinere Hersteller von ORC-Anlagen in Deutschland.

Es werden sowohl detaillierte Vorschläge für weitere Forschung und Entwicklung gemacht als auch aufgrund der verschiedenen Hemmnisse Hinweise gegeben, wie die Akteursgruppen in dem Innovationssystem der ORC-Technik - möglichst abgestimmt und simultan - handeln könnten, um die großen und rentablen ORC-Nutzungspotentiale möglichst schnell in der deutschen Industrie und im Gewerbe zu realisieren. Wichtige Aspekte sind: die CO₂-Abgabe auf fossile Brennstoffe und die Emissionszertifikate machen die Abwärme wertvoller, Kenntnisse zur ORC-Technik müssen breit angelegt über Universitäten, Fortbildungseinrichtungen, Hersteller- und Anwender-Verbände, Contractoren sowie Energie- und Klima-Agenturen vermittelt werden; Referenz-Anlagen sind dabei sehr wichtig. Wegen der hohen Kapitalintensität und des hohen Knowhow-Bedarfs haben Contractoren eine wichtige Rolle.

11. Literatur

- BMWi (2017a): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Änderung der Richtlinie für die Förderung der Abwärmevermeidung und Abwärmenutzung in gewerblichen Unternehmen. Berlin 25.8.2017
- Brückner, S. (2016): Industrielle Abwärme in Deutschland. Dissertation an der TU München. München 2016. Lehrstuhl für Energiesysteme
- Carlsson, B., Stankiewicz, R. (1991): Über die Natur, Funktion und Zusammensetzung technologischer Systeme. *Journal of Evolutionary Economics*. 1 p. 93-118.
- Durakovic, G., Nikolaisen, M. (2019): Performance Comparison of Different Rankine Cycle Technologies Applied to Low and Medium Temperature Industrial Surplus Heat Scenarios. Proceedings of the 5th International Seminar on ORC Power Systems 9 - 11 September 2019, Athens Greece. SINTEF Energy Research
- Enargus Projektdatenbank (2021): Suchworte: ORC-Technik. erweiterte Suche: ab 2021. <https://www.enargus.de/search/?q=ORC%20> (Zuletzt abgerufen 20.12.2021)
- Energie & Management 2012: Marktübersicht ORC-Module. <https://www.energie-und-management.de/fileadmin/ftp/2012-ORC-Module.pdf>; zuletzt geprüft 20.4.2021)
- Frick, S., Kaltschmitt, M. (2009): Ökologische Aspekte einer geothermischen Stromerzeugung - Analyse und Bewertung der Umwelteffekte im Lebensweg. - *Erdöl, Erdgas, Kohle*, 125, 1, 37-42.
- Haltenort, Ph., Jochem, E. (2021): Betrachtungen zur Wechselwirkung von Nanofiltrationstechniken und Abwärmenutzungstechniken. Bericht im Rahmen des Begleitforschungsprojektes Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe. KIT und IREES, beide Karlsruhe.
- Hoffmann, I. Groß, B., Heib, S. (2017): Industrielle Abwärme zur Stromerzeugung: Potenziale und Forschungsbedarf. *FVEE • Themen 2017*, S.34-37
- Ingwersen, H.H. (1986): Handbuch der Mehrfachnutzung industrieller Prozesswärme. ORC-Anlage in einem Chemie-Werk. S.216-220. Gräfelfing/München: Technischer Verlag Resch.
- IREES (2020): Bewertung von thermoelektrischen Generatoren als eine Option der industriellen Abwärmenutzung - ein Statuspapier. Im Rahmen des Forschungsprojektes Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe 1.7.2020 Karlsruhe.
- IZES (2017): Technologiebericht TF 6.3 Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme innerhalb des Forschungsprojekts TF Energiewende. Saarbrücken 2017.
- Jensen, S. (2018): Zweistufige Abwärmenutzung mittels ORC-Technologie: Stromerzeugung und Bereitstellung von Fernwärme. Vortrag Berlin, 7. November 2017, Fa. Dürr Cyplan.
- Jochem, E., Lösch, O., Reitze, F. (2021): Bewertung von Mitteltemperatur-Wärmetauschern als eine zentrale Technik der industriellen Abwärmenutzung. Bericht im Rahmen des Begleitforschungsprojektes Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe. IREES, Karlsruhe.
- Jochem, E., Bradke, H., Marscheider-Weidemann, F., Som, O., Mannsbart, W., Cremer, C., et al. (2009): Improving the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies. Heidelberg: Physica Verlag.
- König, J., Sommer, M., Groß, B., Hoffmann, P., Winkler, M., Bach, D., Bartholome, K., Guss, H., Heuer, J., Luxenburger, M., Noll, F., Pernau, H.F., Tänzler, Guillem, Schäfer-Welsen, O. (2019): Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland - Potentiale und Forschungsbedarf. Fraunhofer IPM, Freiburg.

- Kolasiński, P. (2019). The Application of ORC Systems for Waste Heat Recovery in the Metal Smelting Industry. Proceedings of the 5th International Seminar on ORC Power Systems. 9-11 Sept.2019. Paper ID: 97, p.1-8. Athens, Greece.
- Maier, W., Angerer, G. (Hrsg.) et al. (1986). Rationelle Energieverwendung durch neue Technologien. Kap.B.3: Neue Technologien der Abwärmenutzung. S.69-116 Köln: TÜV Rheinland (Praxis-wissen aktuell) ISBN 3-88585-318-3
- Mayer-Krahmer & Dreher 2004: Neuere Betrachtungen zu Technikzyklen und Implikationen für die Fraunhofer-Gesellschaft. In: Spath, D.: Forschungs- und Technologiemanagement -Potenziale nutzen – Zukunft gestalten Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Hans-Jörg Bullinger, München. Hanser Verlag 2004
- Mintus, F; Stranzinger, B.; Schaper, R.; Küsgen, V. & Spillner, R. (2018): Industrielle Erprobung von thermoelektrischen Generatoren zur Stromerzeugung aus Abwärme (INTEGA). Schlussbericht, Förderkennzeichen 03ET1164 A/B/C. Laufzeit des Vorhabens: 1.5.2013 - 31.10.2017. Hg. v. VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH BFI. Düsseldorf.
- Obernberger I., Gaia M., Biedermann F., 2005: Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses – Stand der Technik und Möglichkeiten der Prozessoptimierung. In: Tagungsband zur internat. Konferenz „Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen“, Juni 2005, Salzburg, Austria, VDI-Bericht Nr. 1891, ISSN 0083-5560, ISBN 3-18-091891-8, pp. 131-148, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf (ed),Germany
- Obernberger, I., Biedermann, F., Thonhofer, P., Gaia, M. & Bini, R. (2008). Neue Klein-ORC-Technologie (200 kWel) für dezentrale Biomasse-KWK-Anlagen. Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen. Springer-VDI-Verlag, Vol.2044. p.133-150 (VDI-Berichte/VDI-Tagungsbände).
- ORC-Fachverband (2017): unter http://www.orcfachverband.de/was_ist_die_orc_technologie_.html , abgerufen am 25.10.2017
- Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U.; Micale, G. (2018): Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. Applied Thermal Engineering 138 (2018) p.2007-2016
- Reitze, F., Jochem, E. (2020): Bewertung von Mitteltemperatur-Wärmetauschern als eine zentrale Technik der industriellen Abwärmenutzung. Statuspapier - IREES 1.7.2020 Karlsruhe.
- Reitze, F., Jochem, E., Lösch, O. (2021): Bewertung von thermoelektrischen Generatoren als eine Option der industriellen Abwärmenutzung. Statuspapier - IREES. 30.9.2021. Karlsruhe.
- Schröter, M., Weißfloch, U., Buschak, D. (2009): Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit? Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken. Mitteilungen aus der ISI-Erhebung. No. 51, Karlsruhe.
- Stieglitz, v. R., Heinzl, V. (2013). Thermische Solarenergienutzung. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer Vieweg. S.487 ff. ISBN: 13- 978-3-642-29474-7
- Tech-for-Future (2021): Deutsche CO2-Budgets für Pariser Klimaziele - Verbleibende Emissionen am 1.1.2022. <https://www.tech-for-future.de/co2-budget/> (geprüft 16.12.2021)
- Toro, F., Jochem, E., Lösch, O., Cerda, M. (2021): Bewertung von Latentwärmespeichern als eine zentrale Technik der industriellen Abwärmenutzung. Statuspapier - IREES 1.7.2020 Karlsruhe.
- Umweltbundesamt (2021). Der Europäische Emissionshandel. 12.7.2021
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>
(Geprüft: 26.12.2021)
- Ziegler, N. ORC-Technik (2011): Strom aus Abwärme ohne Nutzung von Thermoöl. Kraftwerkstechnik

Ziemele, J., Kalmins, R., Vigants, G., Vigants, E., Veidenbergs, I. (2018): Evaluatin of the industrial waste heat potential for its recovery and integration into a fourth generation district heating system. Energy Procedia 147 (2018) 315-321