

Endbericht, 10. Mai 2017

Systematische Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie



energieschweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

M. Sc. Stefan Wolf

M. Sc. Roman Flatau

Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen

PD Dr.-Ing. Markus Blesl

Universität Stuttgart

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

Heßbrühlstr. 49a

70565 Stuttgart

Deutschland

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern

Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | 5 |
| Verzeichnis der Formelzeichen | 5 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Ziel der Arbeit..... | 7 |
| 1.2 Vorgehensweise..... | 7 |
| 1.3 Stand der Forschung..... | 8 |
| 2 Rahmenbedingungen in der Schweiz | 8 |
| 2.1 Datenerfassung..... | 8 |
| 2.2 Ergebnisse der Expertenbefragung | 10 |
| 2.2.1 Auswertung und Beschreibung der Ergebnisse..... | 11 |
| 2.3 Fazit und Empfehlung | 19 |
| 3 Stand der Wärmepumpentechnik | 21 |
| 3.1 Kompressionswärmepumpen | 22 |
| 3.2 Absorptionswärmepumpen | 23 |
| 3.3 Neue Wärmepumpentypen | 25 |
| 3.4 Zusammenfassung und Marktübersicht..... | 28 |
| 4 Anwendung von Wärmepumpen in Industriebetrieben | 31 |
| 4.1 H. v. Nahrungs- und Futtermitteln, H. v. Getränken | 33 |
| 4.2 H. v. Textilien, H. v. Bekleidung | 35 |
| 4.3 H. v. Papier, Pappe und Waren daraus | 36 |
| 4.4 H. v. chemischen Erzeugnissen, H. v. pharmazeutischen Erzeugnissen..... | 37 |
| 4.5 H. v. Metallerzeugnissen, Maschinenbau | 38 |
| 4.6 Übrige Industriezweige..... | 39 |
| 5 Schlussbetrachtung | 41 |
| Literaturverzeichnis | 43 |
| Anhang A: Umfrage Fragebogen | 47 |
| Anhang B: Umfrageergebnis Rohdaten | 49 |
| Anhang C: Workshop „Industriewärmepumpen in der Schweiz“ | 54 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|---|
| AbWP | <i>Absorptionswärmepumpe</i> |
| BFE | <i>Bundesamt für Energie</i> |
| BFS | <i>Bundesamt für Statistik</i> |
| BV | <i>Brüdenverdichter</i> |
| ChemRRV | <i>Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung</i> |
| CHF | <i>Schweizer Franken</i> |
| CIP | <i>Cleaning in Place</i> |
| EFH | <i>Einfamilienhaus</i> |
| GWP | <i>Global Warming Potential</i> |
| H. v. | <i>Herstellung von</i> |
| HPP | <i>Heat Pump Programme</i> |
| HyWP | <i>Hybrid-Wärmepumpe</i> |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| iets | <i>Industrial Energy-Related Technologies and Systems</i> |
| KWP | <i>Kompressionswärmepumpe</i> |
| MFH | <i>Mehrfamilienhaus</i> |
| WKK | <i>Wärmeerkraftkopplung</i> |

Verzeichnis der Formelzeichen

| | |
|-------------|--|
| i | Antwortkategorie i |
| j | Frage j |
| k | Unterfrage k |
| $m_{i,j}$ | Anzahl der Antworten für die Antwortkategorie i auf die Frage j |
| $m_{i,j,k}$ | Anzahl der Antworten für die Antwortkategorie i_j auf die Unterfrage k der Frage j |
| n | Anzahl aller ausgefüllten Fragebögen |
| $n_{j,k}$ | Anzahl der Antworten auf die Unterfrage k der Frage j |
| $P_{i,j}$ | Prozentualer Anteil für die Antwortkategorie i auf die Fragen j |
| $p_{x,y}$ | Korrelation |
| \bar{x}_k | Mittelwert |

1 Einleitung

Die vorliegende Studie bietet einen Überblick über die Rolle der Wärmepumpentechnik für den industriellen Sektor der Schweiz. Im Rahmen der Einleitung werden zunächst die Ziele und die gewählte Vorgehensweise beschrieben, bevor in den nachfolgenden Kapiteln die Wärmepumpentechnik und deren industrielle Anwendung mit Blick auf die Schweiz betrachtet werden.

1.1 Ziel der Arbeit

Die Anwendung von Wärmepumpen in der Industrie stellt aufgrund der großen Diversität der technischen Rahmenbedingungen eine große Herausforderung dar. In der mangelnden Verbreitung von Fachwissen über die Evaluation und Planung von Großwärmepumpen liegt ein entscheidendes Hemmnis für die Anwendung dieser Technik (Lambauer et al., 2008, Wolf et al., 2014). Mit der vorliegenden Studie wird das Ziel verfolgt, das Wissen zu systematisieren und Transparenz über die Fähigkeiten und die Anwendungsbereiche von Großwärmepumpen zu schaffen. Zudem wird die Frage beantwortet, ob die Wärmepumpentechnik verstärkt im industriellen Sektor der Schweiz Anwendung finden kann.

1.2 Vorgehensweise

Im Rahmen der Studie werden zunächst die Rahmenbedingungen für die Wärmepumpentechnik in der Schweiz erfasst. Zu diesem Zweck wird eine Umfrage unter Experten aus den Bereichen Industrie, Wärmepumpenhersteller, Planung und Energieberatung, Energiewirtschaft und Wissenschaft durchgeführt. Mit dieser Umfrage werden die Marktsituation und die zukünftig zu erwartende Entwicklung des Wärmepumpenmarkts in der Schweiz abgefragt. Zudem werden Anwendungsmöglichkeiten für Wärmepumpen in der Industrie, Hemmnisse für die Wärmepumpenanwendung sowie der bestehende Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Sicht der Forschungseinrichtungen, sowie auf Herstellerseite analysiert.

Darüber hinaus wird eine Wissensaggregation und zum Entwicklungsstand der Wärmepumpentechnik und den Anwendungsmöglichkeiten für Wärmepumpen in der Industrie durchgeführt. Hierzu werden die wissenschaftliche Fachliteratur ebenso wie Informationen von Herstellern und Verbänden ausgewertet und zusammengefasst. Die Analyse des Stands der Wärmepumpentechnik fokussiert sich auf die etablierten Technologien (elektrische Kompressionswärmepumpe und Absorptionswärmepumpe). Ergänzend hierzu wird auf neue Wärmepumpenkonzepte (Hybrid-Wärmepumpe, thermoakustische Wärmepumpe und Rotationswärmepumpe) eingegangen. Im Bereich der Anwendung werden Möglichkeiten zur Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme spezifisch für einzelne Industriezweige betrachtet. Zudem wird basierend auf statistischen Daten eine Einordnung der Bedeutung dieser Industriezweige in der Schweiz vorgenommen.

1.3 Stand der Forschung

Im Rahmen der ersten Verbreitungswelle der Wärmepumpentechnik in Folge der Ölpreiskrisen 1973 und 1979 wurden umfangreichere Untersuchungen zu Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie angestellt (Eder, Moser und Kögl, 1979, HPT Annex 21 members, 1995, Berntsson und Franck, 1997). Mit Einleitung der globalen Transition hin zu einem dekarbonisierten Energiesystem und dem Anstieg der fossilen Energieträgerpreise in den 2000er Jahren wurden diese Forschungen intensiviert (Lambauer et al., 2008, Wolf et al., 2014, HPT/iets Annex 35/13 Members, 2014). Mit dem IEA HPT/iets Annex 35/13 „Application of industrial heat pumps“ wurden die Entwicklungen zur industriellen Anwendung der Wärmepumpentechnik von 15 teilnehmenden Organisationen aus 9 Ländern (Österreich, Kanada, Dänemark, Deutschland, Japan, Niederlande, Südkorea und Schweden). Im Rahmen des Annex 35/13 wurden für die beteiligten Länder eine Marktanalyse vorgenommen, Modelle für die Bewertung von Wärmepumpensystemen evaluiert, ein Technologiescreening durchgeführt und 115 Fallstudien und Anwendungsfälle gesammelt. Die Arbeiten des Annex 35/13 werden im Annex 48 „Industrial Heat Pumps“ mit einer Laufzeit von 2016 bis 2019 fortgeführt.

2 Rahmenbedingungen in der Schweiz

Nachfolgend werden die aktuellen Rahmenbedingungen in der Schweiz anhand einer Expertenbefragung analysiert. Einleitend wird in Abschnitt 2.1 das methodische Vorgehen der Datenerfassung dargelegt. In den Abschnitten 2.2 und 2.3 werden die Ergebnisse der Expertenbefragung sowie daraus abgeleitete Erkenntnisse und Handlungsoptionen präsentiert.

2.1 Datenerfassung

Die Datenerfassung beruht auf einer Befragung unterschiedlicher Experten/Stakeholder (u. a. Hersteller, Planer/Consultants, Energiewirtschaft) aus der D-A-CH Region mittels Fragebogen. Der Schwerpunkt liegt auf Experten aus der Schweiz. Nachfolgend wird auf die Zusammensetzung der Expertengruppe, den eingesetzten Befragungsprozess, den Aufbau des Fragebogens sowie die statistische Auswertung eingegangen.

Expertengruppe: Die Zusammensetzung der Expertengruppe hat einen interdisziplinären Fokus (Welty, 1972). Sie setzt sich aus Vertretern/Stakeholdern aus sechs Bereichen zusammen: (1) Planer/Consultants, (2) Hersteller, (3) Industrie, (4) Wissenschaft, (5) Energiewirtschaft und (6) Sonstige. Durch die Befragung von Experten/Stakeholdern mit direktem und indirektem Bezug zur Anwendung der Wärmepumpentechnik in der Industrie wird ein höheres Informationsniveau im Vergleich zu einer homogenen Expertengruppe erwartet ((Vorgrimler und Wübben, 2003); Hoffmeyer-Zlotnik, 1992). Allgemein richtet sich die Größe der Expertengruppe nach der Komplexität der Fragestellung sowie der Kompetenz der Teilnehmer (Häder und Häder, 1998). Ziel dieser Untersuchung ist die Befragung von mindestens 20 Experten.

Befragung: Der Fragebogen wird mit einem zeitlichen Vorlauf von ein bis zwei Werktagen per E-Mail an die Experten/Stakeholder verschickt, anschließend erfolgt die telefonische Kontaktauf-

nahme. Ist die telefonische Kontaktaufnahme mehrfach erfolglos geblieben, werden die Experten/Stakeholder schriftlich gebeten, einen Termin für ein Telefoninterview zu vereinbaren oder alternativ den ausgefüllten Fragebogen zurückzuschicken. Ziel des mehrstufigen Befragungsprozesses ist das Erreichen einer möglichst hohen Rücklaufquote.

Fragebogen: Der Fragebogen umfasst 12 Fragen (Anhang A: Fragebogen). Der Umfang des Fragebogens wurde dabei so gewählt, dass die telefonische Befragung in maximal 30 Minuten abgeschlossen werden kann. Die ersten drei Fragen dienen zur Selbsteinschätzung der Befragten mit Blick auf Kenntnisse der Wärmepumpentechnik sowie zu Industrieprozessen. Anschließend werden die Bedeutung der Wärmepumpentechnologie sowie das zukünftige Entwicklungspotenzial in der Schweiz in unterschiedlichen Segmenten (u. a. Industrieprozesse, Wärmenetze) abgefragt und das Anwendungspotenzial in unterschiedlichen Industriebranchen erfasst. Daran anknüpfend folgen sechs offene Fragen zu möglichen „best-practice“ Beispielen von Wärmepumpen in der Industrie, Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarf der Wärmepumpentechnologie sowie zu Hemmnissen für die Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie.

Auswertung: Die Auswertung der Fragebögen erfolgt unter Verwendung gängiger Methoden der Statistik. Für die Auswertung der Beteiligung nach Zugehörigkeit zu einer Expertengruppe bzw. zu einer Nationalität wird der prozentuale Anteil der Teilnehmer an der Gesamtheit aller Teilnehmer bestimmt. Gleiche Vorgehensweise wird für die Auswertung der Fragen 1 und 2 eingesetzt¹ (siehe Formel 2-1):

$$P_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{n} \cdot 100 \% \quad \forall j \in \mathbb{N} \{generisch \setminus 4, 5, 6, 8, 9, 10\} \quad 2-1$$

mit

$P_{i,j}$ Prozentualer Anteil für die Antwortkategorie i auf die Fragen j mit $P_{i,j} \in \mathbb{Q} \{0, \dots, 100\}$

$m_{i,j}$ Anzahl der Antworten für die Antwortkategorie i auf die Frage j mit $m_{i,j} \in \mathbb{N} \{0, \dots, n\}$

n Anzahl aller ausgefüllten Fragebögen ($n = 24$)

i Antwortkategorie i mit $i \in \{generisch\}$

j Frage j mit $j \in \{generisch \setminus 4, 5, 6, 8, 9, 10\}$

Für die Fragen 4, 5, 6, 8, 9 und 10 werden zur Berechnung der prozentualen Anteile für die Antwortkategorie i_j ausschließlich die Anzahl der Antworten auf selbige Frage j und Unterfrage² k berücksichtigt (siehe Formel 2-2):

$$P_{i_j,j} = \frac{m_{i_j,j,k}}{n_{j_k}} \cdot 100 \% \quad \forall j \in \mathbb{N} \{4, \dots, 10 \setminus 7\} \quad 2-2$$

mit

$P_{i_j,j}$ Prozentualer Anteil für die Antwortkategorie i_j auf die Fragen j mit $P_{i_j,j} \in \mathbb{Q} \{0, \dots, 100\}$

$m_{i_j,j,k}$ Anzahl der Antworten für die Antwortkategorie i_j auf die Unterfrage k der Frage j mit $m_{i_j,j,k} \in \mathbb{N} \{0, \dots, n\}$

¹ Auf eine Gewichtung der Antworten entsprechend der Selbsteinschätzung der Experten (siehe bspw. Vorgrimler und Wübben (2003), Amara und Lipinski (1971)) wird verzichtet, da die Definition der Gewichtungsfaktoren i. d. R. willkürlich erfolgt.

² Eine Differenzierung der Fragen j in Unterfragen k ist i. W. für die Frage 6 relevant. Hier variiert die Anzahl der erhaltenen Antworten hinsichtlich der jeweiligen Industriebranchen. Für die übrigen Fragen (z. B. Frage 4 und 5) haben die Teilnehmer entweder alle Unterfragen beantwortet oder die Frage ausgelassen, sodass eine Differenzierung nicht notwendig ist.

- $n_{j,k}$ Anzahl der Antworten auf die Unterfrage k der Frage j mit $n_{j,k} \in \mathbb{N} \{0, \dots, n\}$
 i_j Antwortkategorie i_j mit $i_j \in \begin{cases} \{1, 2, 3, 4, 5\} & \text{wenn } j \in \{4, 5, 6\} \\ \{\text{generisch}\} & \text{wenn } j \in \{8, 9, 10\} \end{cases}$
 j Frage j mit $j \in \mathbb{N} \{4, \dots, 10 \setminus 7\}$
 k Unterfrage k mit $k \in \begin{cases} \{1\} & \text{wenn } j \in \{4, \dots, 10 \setminus 6, 7\} \\ \{1, \dots, 8\} & \text{wenn } j \in \{6\} \end{cases}$

2.2 Ergebnisse der Expertenbefragung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Expertenbefragung präsentiert. In Abschnitt 0 wird zunächst auf die Beteiligung eingegangen. Anschließend folgt eine statistische Auswertung der Ergebnisse in Abschnitt 2.2.1. Im Abschnitt 2.3 werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Die aggregierten Originaldaten werden im Anhang B: Originale Ergebnisse dokumentiert.

Die Datenerfassung beruht auf einer Befragung von 42 Experten. Bis zum Abschluss der Befragung konnten 28 Rückmeldungen von Experten eingeholt und für die Auswertung genutzt werden. Dies entspricht einer hohen Rücklaufquote von 67 %. Dies verdeutlicht das bestehende grundsätzliche Interesse an dieser Thematik in der Schweiz. Die Abbildung 2-1 zeigt die Rücklaufquote der befragten Experten/Stakeholder entsprechend ihrer Berufsgruppe.

$$n_{Ges} = 28$$

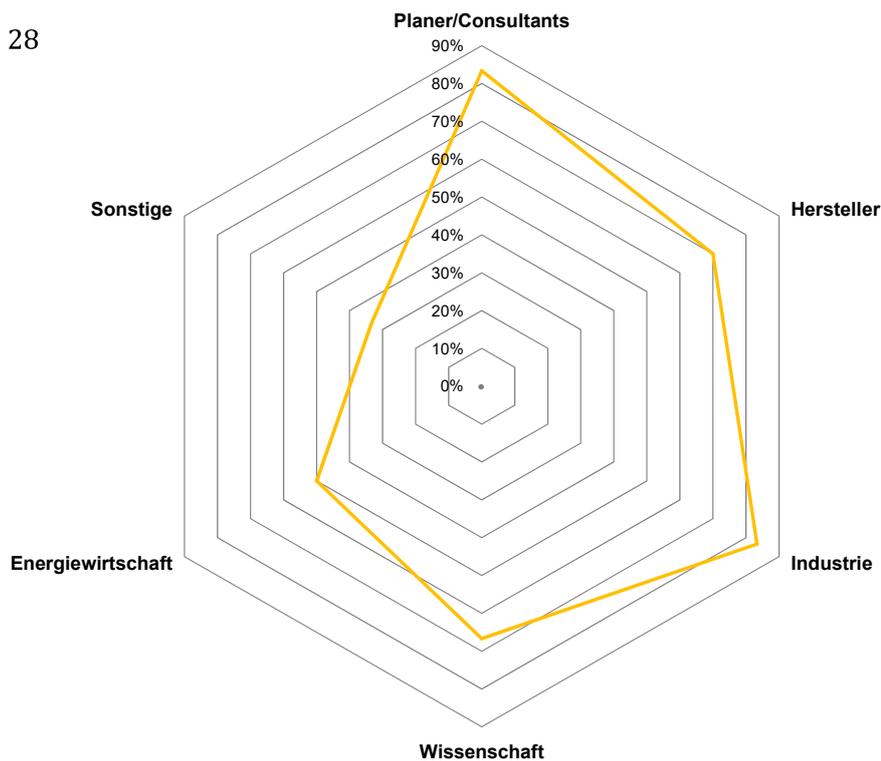


Abbildung 2-1: Rücklaufquote der Experten/Stakeholder nach ihrer Berufsgruppe

Quelle: eigene Darstellung

Bei den befragten Planern/Consultants sowie Industrievertretern wurde eine Rücklaufquote von je 83 % erzielt. Von den befragten Herstellern beteiligen sich 70 %, von Vertretern der Wissenschaft 67 % und von Vertretern der Energiewirtschaft 50 %. Die Rücklaufquote sonstiger Stakeholder beträgt 33 %.

2.2.1 Auswertung und Beschreibung der Ergebnisse

Die Auswertung der Expertenbefragung ist in sechs Kategorien unterteilt. Dabei wird zunächst auf die Zusammensetzung der Teilnehmer hinsichtlich Berufsfeld und Lokalisierung eingegangen (s. Abschnitt 2.2.1.1). Anschließend erfolgt eine Übersicht zur Selbsteinschätzung der befragten Experten (s. Abschnitt 2.2.1.2). Hiernach werden die heutige und zukünftige Bedeutung in unterschiedlichen Segmenten (s. Abschnitt 2.2.1.3) sowie die Relevanz der Wärmepumpentechnik in unterschiedlichen Industriezweigen diskutiert (s. Abschnitt 2.2.1.4). Abschließend werden Themen mit weiterem Forschungsbedarf (s. Abschnitt 2.2.1.5) sowie mögliche Hemmnisse gegenüber der Wärmepumpentechnologie (s. Abschnitt 2.2.1.6) präsentiert.

2.2.1.1 Zusammensetzung der Teilnehmer

Im Rahmen der Expertenbefragung wurden je 6-10 Experten/Stakeholder unterschiedlicher Zielgruppen (Planer/Consultants, Hersteller, Industrie, Wissenschaft, Energiewirtschaft, Sonstige) kontaktiert³. Mit einem Anteil von 25 % an den Teilnehmern stellen die Hersteller von Wärmepumpen die größte Zielgruppe dar, gefolgt von der Wissenschaft mit 21 %. Auf die Experten/Stakeholder aus Industrie und Planer/Consultants entfallen jeweils 18 % und auf die Energiewirtschaft 14 %. Sonstige Experten repräsentieren 4 % der Teilnehmer (siehe Abbildung 2-2).

$n_{Ges} = 28$

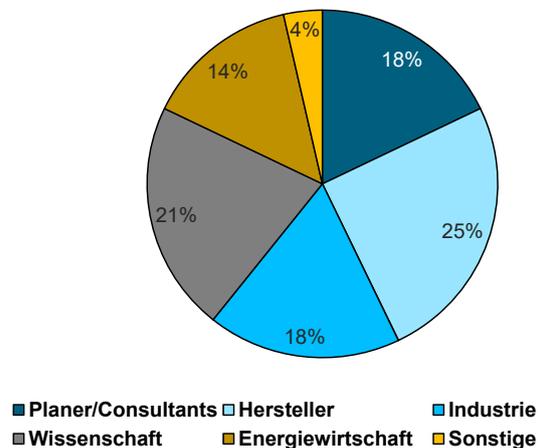


Abbildung 2-2: Zugehörigkeit der Teilnehmer nach Berufsgruppe

Quelle: eigene Darstellung

³ Ausnahme: Es werden 3 Stakeholder der Gruppe „Sonstige“ befragt.

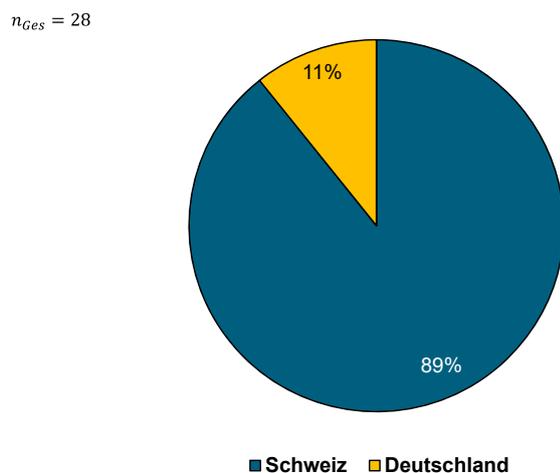


Abbildung 2-3: Lokalisierung der Teilnehmer

Quelle: eigene Darstellung

Mit Blick auf die Lokalisierung der Teilnehmer wird deutlich, dass der Fokus auf den Schweizer Markt gelegt wird (89 %). Relevante Stakeholder aus benachbarten Ländern sind insbesondere Hersteller, die Wärmepumpen in den Schweizer Markt liefern (siehe Abbildung 2-3).

2.2.1.2 Selbsteinschätzung der Teilnehmer

Mit der Befragung wurden Vertreter unterschiedlicher Zielgruppen und mit unterschiedlichen Kenntnisständen befragt. 43 % der Teilnehmer schätzen ihre eigenen Kenntnisse zur Wärmepumpentechnologie als „sehr gut“ und 39 % als „gut“ ein. Die übrigen 18 % verfügen nach eigener Angabe über „durchschnittliche Kenntnisse“ zur Wärmepumpentechnik (siehe Abbildung 2-4).

Frage 1: Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse der Wärmepumpentechnik auf einer Skala von 1 (keine Kenntnisse) bis 5 (sehr gute Kenntnisse) ein?

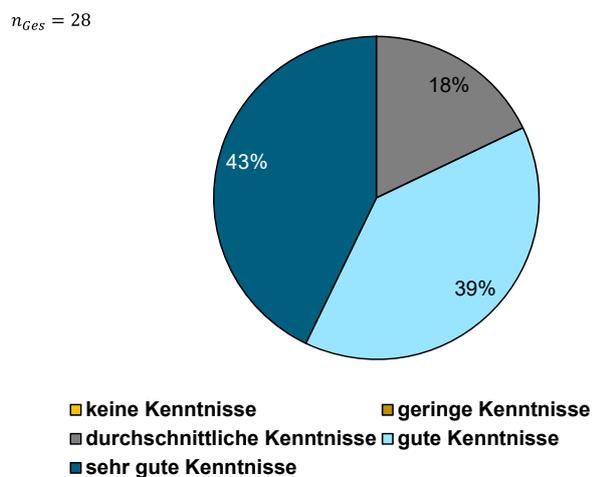


Abbildung 2-4: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 1

Quelle: eigene Darstellung

In puncto Industriekenntnisse ist das Ergebnis der Selbsteinschätzung im Vergleich zu den Kenntnissen der Wärmepumpentechnik heterogener. 32 % der Teilnehmer besitzen „sehr gute“ und 36 % „gute“ Kenntnisse der Industrieprozesse. 29 % der Teilnehmer verfügen über „durchschnittliche“ Kenntnisse der Industrieprozesse. Ein kleiner Anteil von 4 % hat nach eigenen Einschätzungen „geringe“ Kenntnisse der Industrieprozesse (siehe Abbildung 2-5). Auf Basis der Selbsteinschätzung kann eine hohe Affinität zu Fragen des Wärmepumpeneinsatzpotenzials in der Industrie festgestellt werden.

Frage 2: Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse zu Industrieprozessen auf einer Skala von 1 (keine Kenntnisse) bis 5 (sehr gute Kenntnisse) ein?

$n_{Ges} = 28$

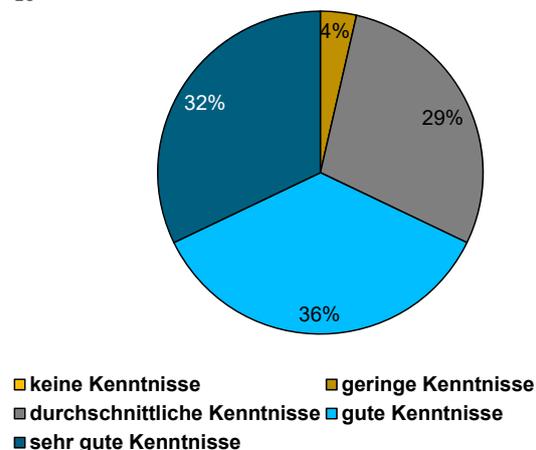


Abbildung 2-5: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 2

Quelle: eigene Darstellung

2.2.1.3 Heutige und zukünftige Bedeutung unterschiedlicher Segmente

Die Einsatzmöglichkeiten der Wärmepumpentechnologie in unterschiedlichen Segmenten wird von den Experten zum heutigen Zeitpunkt wie folgt eingeschätzt: 50 % bzw. 54 % messen der Wärmepumpentechnik eine „sehr große“ Bedeutung in den Segmenten Ein- und Mehrfamilienhäusern zu. Die Bedeutung in den Segmenten Büro- und Industriegebäude sowie Wärmenetze wird von je 32 % als „sehr groß“ eingeschätzt. Eine „sehr große“ Bedeutung der Industrieprozesse wird von 21 % der Teilnehmer konstatiert. Mit 50 % sieht die Hälfte der Teilnehmer eine geringe/durchschnittliche Bedeutung der Wärmepumpentechnik in Industrieprozessen (siehe Abbildung 2-6).

Die Entwicklung der Wärmepumpentechnik in den nächsten fünf Jahren im Schweizer Markt wird von den Experten positiv eingeschätzt. Mit durchschnittlich 25 % bemessen diese die Bedeutung in allen Segmenten mit „sehr groß“ bzw. 67 % als „groß“ bis „sehr groß“. Das Entwicklungspotenzial für die Segmente Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Büro- und Industriegebäude wird lediglich von 7 %, 7 % und 4 % der Teilnehmer als „gering“ eingeschätzt. Der leichte Rückgang im Bereich der Einfamilienhäuser in Verbindung mit der hohen Bedeutung zum heutigen Zeitpunkt zeigt, dass die Wärmepumpentechnologie dort bereits Einzug gehalten hat.

Frage 4: Bitte ordnen Sie die Bedeutung der Segmente Industrieprozesse, Wärmenetze, Büro- und Industriegebäude, Mehrfamilienhäuser, Einfamilienhäuser im Wärmepumpenmarkt auf einer Skala von 1 (keine Bedeutung) bis 5 (sehr große Bedeutung) ein.

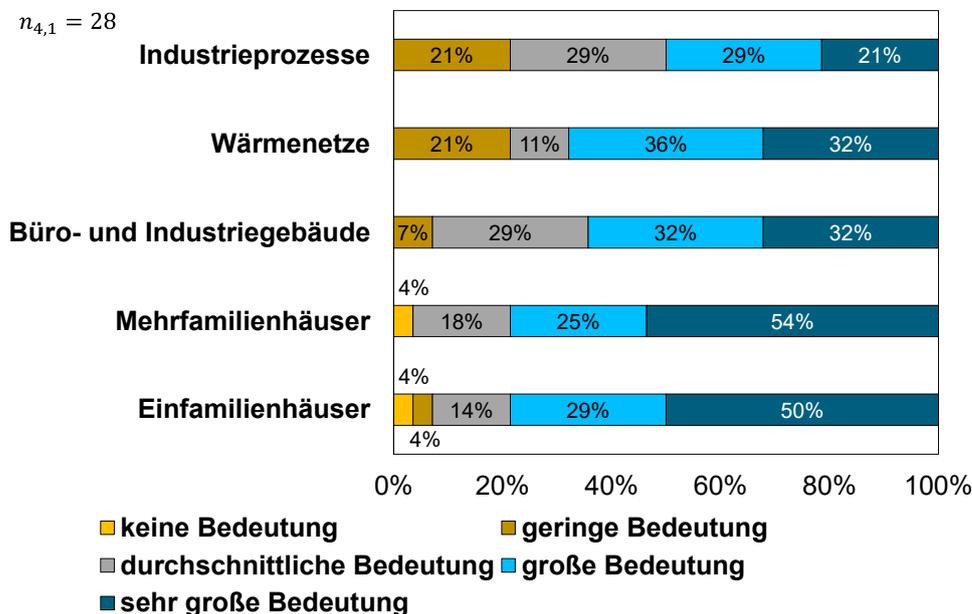


Abbildung 2-6: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 4

Quelle: eigene Darstellung

Frage 5: Bitte geben Sie an, welche Entwicklung Sie für die einzelnen Segmente des Wärmepumpenmarkts in der Schweiz in den nächsten fünf Jahren annehmen. Ordnen Sie bitte Ihre Annahmen auf einer Skala von 1 (stark abnehmende Bedeutung) bis 5 (stark zunehmende Bedeutung) ein.

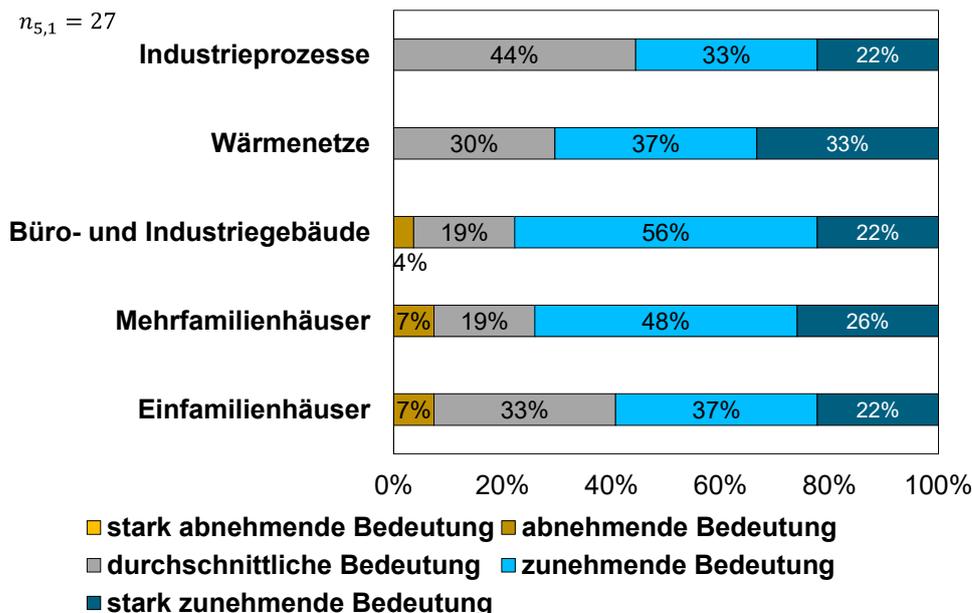


Abbildung 2-7: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 4

Quelle: eigene Darstellung

Zukünftig ist im Gebäudebereich die Optimierung der installierten Anlagen/Systeme von besonderer Relevanz. Mit zunehmender Bedeutung von Wärmepumpen in großen Gebäuden rückt zusätzlich das Thema der Größenskalierung der etablierten Technologien in den Fokus. Die wachsende Bedeutung von Wärmepumpen in der Industrie ist mit einer zunehmenden Substitution fossiler Energieträger zur Wärmeerzeugung verbunden, die aktuelle Zurückhaltung ist insbesondere auf fehlende Kenntnisse und Informationen, Kosten sowie Skepsis gegenüber der technischen Eignung der Wärmepumpentechnologie zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.2.1.6).

2.2.1.4 Relevanz unterschiedlicher Industriezweige

Die Bedeutung der Wärmepumpentechnik in unterschiedlichen Industriezweigen wird von den Experten unterschiedlich eingeschätzt. Beispielsweise schätzen 9 % der Befragten die Relevanz der Papierindustrie mit „keiner Bedeutung“ ein, während 23 % der Papierindustrie je eine „sehr große“ bzw. eine „große“ Bedeutung zuordnen. Ein vergleichsweise heterogenes Bild zeichnet sich für die Bekleidungs- und Textilindustrie ab. Ein homogenes Bild ist für den Maschinenbau zu erkennen, hier bewerten 43 % der Teilnehmer die Relevanz als durchschnittlich. Die größte Bedeutung wird der Nahrungsmittelindustrie sowie Chemie/Pharma zugeordnet. Für erstgenannte Branche bewerten 52 % die Bedeutung als „groß“ und 37 % als „sehr groß“, für zweitgenannte Branche bewerten 48 % die Bedeutung als „groß“ und 20 % als „sehr groß“. „Keine Bedeutung“ sprechen die Experten den Branchen Metallerzeugnisse (9 %), Metalle (14 %), Mineralien (39 %), Papier (9 %) und Bekleidung/Textilien (11 %) zu (siehe Abbildung 2-8).

Frage 6: Bitte bewerten Sie das Anwendungspotenzial für Wärmepumpen in einzelnen Industriezweigen auf einer Skala von 1 (keine Bedeutung) bis 5 (sehr große Bedeutung) und machen Sie Angaben zur üblichen Wärmeversorgung und möglichen Wärmepumpenanwendungen.

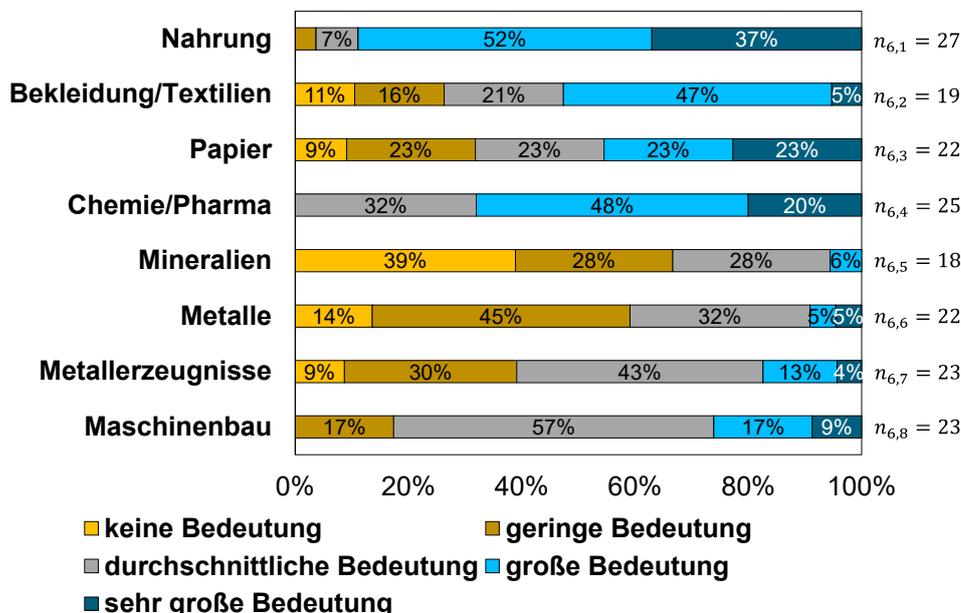


Abbildung 2-8: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 6

Quelle: eigene Darstellung

Die Auswertung der Expertise der Teilnehmer in den einzelnen Branchen zeigt, dass Experten aller Branchen berücksichtigt wurden, wobei hier ein Unterschied zwischen den Branchen zu erkennen ist. 58 % der Teilnehmer verfügen bspw. über Kenntnisse im Maschinenbau, während 8 % Kenntnisse im Bereich Mineralien vorweisen (siehe Abbildung 2-9). Es ist eine deutlich positive Korrelation zwischen der Anzahl der Experten mit besonders guten Kenntnisse in einer Branche und der Anzahl der Antworten selbiger Branche zu erkennen ($p_{x,y} = 0,856$). Dies deutet darauf hin, dass Experten ohne Kenntnisse der jeweiligen Branchen tendenziell auf eine Einschätzung verzichtet und somit die Ergebnisse nicht zum positiven/negativen beeinflusst haben.

Frage 3: In welchen Industriezweigen kennen Sie sich besonders gut aus?

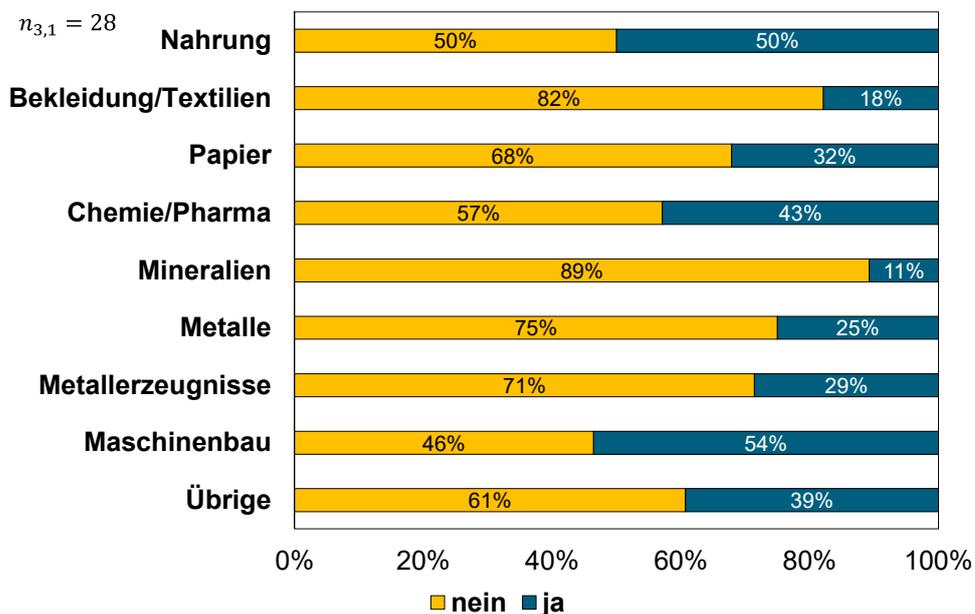


Abbildung 2-9: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 4

Quelle: eigene Darstellung

2.2.1.5 Forschungsbedarf

Die Auswertung der Einschätzungen der Stakeholder zum Forschungsbedarf der Hersteller einerseits sowie der Universitäten und Forschungseinrichtungen andererseits führt zu folgendem Ergebnis: Für beide Gruppen wird der Temperaturbereich⁴ der Wärmepumpen als einer der Hauptforschungsschwerpunkte identifiziert (Hersteller: 58 %, Forschung/Wissenschaft: 19 %). Seitens der Hersteller wird darüber hinaus die Reduktion der Kosten für Investition, Unterhalt und Betrieb mit 42 % als der zweitwichtigste Forschungsschwerpunkt identifiziert (s. Abbildung 2-10). Auf der Meta-

⁴ Aktuell ist ein Temperaturbereich bis ca. 110 °C technisch möglich. Zukünftig (bis 2020) sollen Temperaturen von 130 °C bis 160 °C erreicht werden (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Ebene lassen sich die genannten Forschungsfelder in fünf Kategorien entsprechend ihrer absteigenden Bedeutung⁵ wie folgt ordnen: Prozess (41 %), Kosten (22 %), technologische Weiterentwicklung (16 %), Betrieb (12 %) sowie Kenntnisse und Informationen (9 %).

Frage 8: Wo sehen Sie auf Seiten der Hersteller Bedarf für die Weiterentwicklung von Industrie- und Großwärmepumpen?

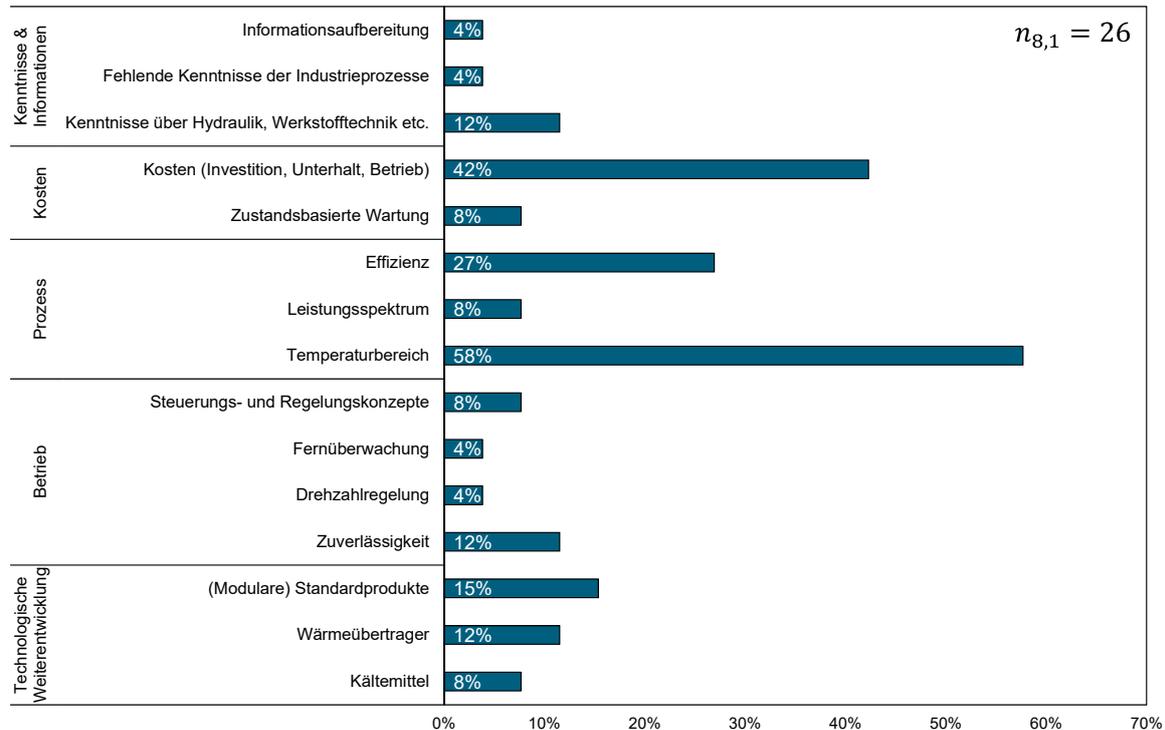


Abbildung 2-10: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 8

Quelle: eigene Darstellung

Für die Forschung/Wissenschaft stellt mit 46 % die Weiterentwicklung der Kältemittel den zentralen Schwerpunkt dar, weitere 15 % sehen die Komponentenoptimierung durch Forschung/Wissenschaft als besonders relevant (s. Abbildung 2-11). Anders als der Forschungsbedarf der Herstellern lässt sich der Forschungsbedarf für die Wissenschaft in vier Kategorien entsprechend ihrer absteigenden Bedeutung⁶ ordnen: Technologische Weiterentwicklung (44 %), Prozess (27 %), Kenntnisse und Informationen (16 %) sowie Betrieb (13 %). Die Auswertung zeigt, dass der Forschungsbedarf zur Reduktion der Kosten sowie zum Einsatz intelligenter (zustandsbasierter) Wartungssysteme auf Seiten der Hersteller allokiert wird, während der Schwerpunkt der universitären Forschung im Bereich der technologischen Weiterentwicklung sowie der Prozessoptimierung angesehen wird.

⁵ Die Bedeutung bemisst sich anhand der Anzahl der Nennungen je Kategorie bezogen auf die gesamte Anzahl an Nennungen ($n_{Ges,8} = 50$).

⁶ Vgl. a. a. O. Fn. 2, ($n_{Ges,9} = 37$).

Frage 9: Wo sehen Sie auf Seiten von Universitäten und Forschungseinrichtungen Bedarf für die Weiterentwicklung von Industrie- und Großwärmepumpen?

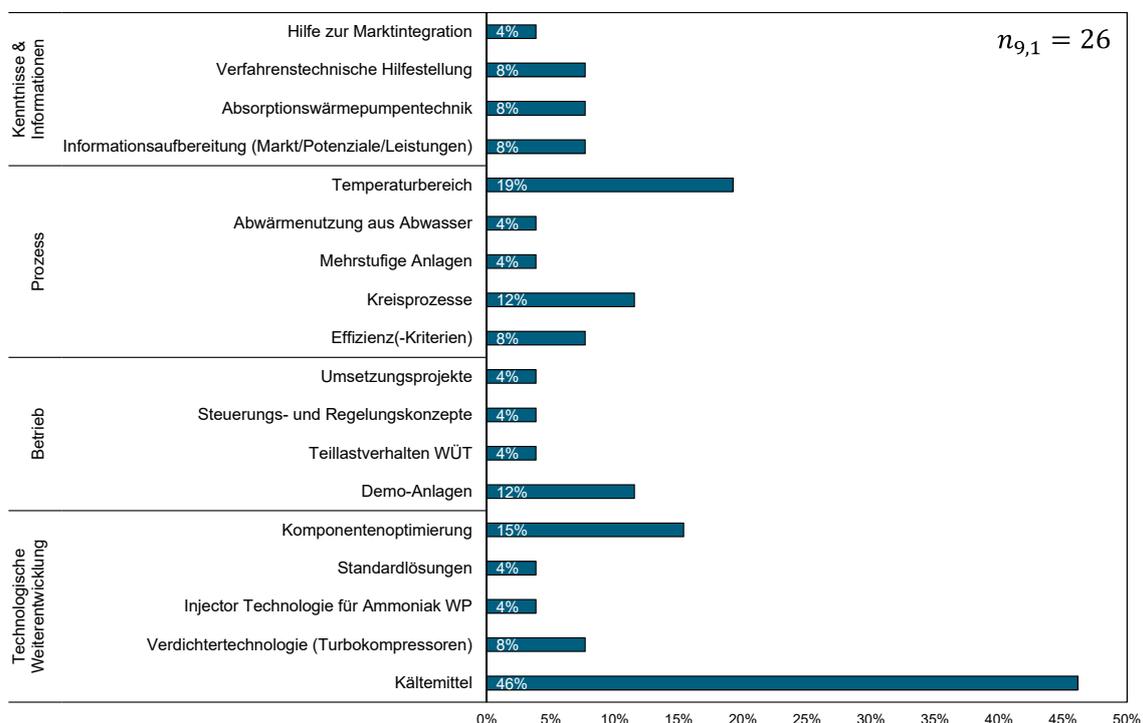


Abbildung 2-11: Auswertung der Ergebnisse für die Frage 9

Quelle: eigene Darstellung

2.2.1.6 Hemmnisse

Die von den Stakeholdern identifizierten Hemmnisse lassen sich in die Kategorien Technologie und Prozess, Kosten sowie Kenntnisse und Informationen untergliedern. Das größte Hemmnis stellen mit 37 % die aktuellen Energiepreise⁷ dar, gefolgt von den hohen Erwartungen in der Industrie an die Amortisationszeit⁸, der Produktakzeptanz und hohen Investitionen (je 22 %). Die fehlende Produktakzeptanz ist bspw. durch die wenigen Erfahrungswerte zu begründen. Ein weiteres Hemmnis stellt mit 19 % der Mangel an Wissen über Möglichkeiten der Wärmepumpentechnik in der Industrie dar. Darüber hinaus gibt es eine Reihe an Einzelnennungen, bspw. „Fehlendes Wissen der Fachplaner“, „hinderliche Besteuerungsmodelle von Strom“, „keine LCC-Betrachtung“, „Wirkungsgrade“ sowie „Zielkonflikt zwischen direkter Abwärmenutzung und Wärmepumpen“ (s. Abbildung 2-12). Im Falle einer Überschusssituation an Abwärme kann durch einen Blick über die Betriebsgrenze ein möglicher Abnehmer identifiziert werden, sodass der Zielkonflikt zwischen direkter Abwärmenutzung und Wärmepumpen umgangen werden kann. In Abschnitt 2.3 werden mögliche Handlungsoptionen zum Lösen der Hemmnisse vorgestellt.

⁷ Unter dem Begriff „Energiepreise“ werden alle Antworten gesammelt, die die Strom- und/oder Brennstoffpreise betreffen. Während in einigen Antworten speziell auf den zu hohen Strompreis (und somit implizit auf das Verhältnis von Strompreis zu Brennstoffpreis) hingewiesen wurde, bleiben andere Antworten eher unspezifisch und nennen „Energiepreise zu tief“.

⁸ Ein Experte der Energiewirtschaft beziffert die geforderten Amortisationszeiten in der Industrie mit 2-3 Jahren.

Frage 10: Was sehen Sie als die wesentlichen Hemmnisse für die Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie an?

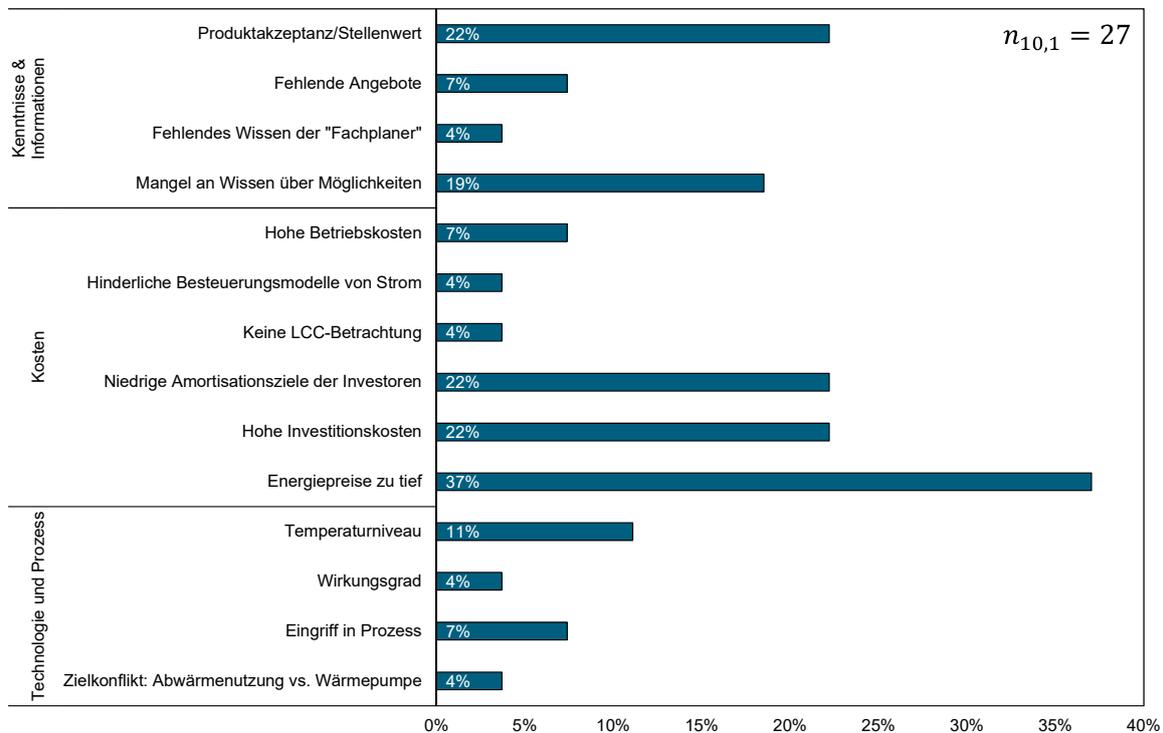


Abbildung 2-12: : Auswertung der Ergebnisse für die Frage 10 (Anteil der Befragten, die die Hemmnisse genannt haben)

Quelle: eigene Darstellung

2.3 Fazit und Empfehlung

Die Ergebnisse der Expertenbefragung zeigen, dass die Bedeutung der Wärmepumpentechnologie in der Schweizer Industrie zum heutigen Zeitpunkt im Vergleich zu den Segmenten Ein- und Mehrfamilienhäuser, Büro- und Industriegebäude und Wärmenetze wesentlich schwächer ausgeprägt ist. Lediglich 21 % der Befragten ordnen der Anwendung der Wärmepumpentechnologie in der Industrie eine „sehr große Bedeutung“ zu. Mit Blick auf das Anwendungspotenzial wird in den nächsten 5 Jahren segmentübergreifend eine (stark) zunehmende Bedeutung erwartet. Im segmentübergreifenden Durchschnitt rechnen 42 % der Befragten mit einer zunehmenden und weitere 25 % mit einer stark zunehmenden Bedeutung.

Gemäß des Mittelwerts (\bar{x}_k) aus der Bedeutung der jeweiligen Branche über die Anzahl der abgegebenen Stimmen lassen sich die Industriebranchen in drei Gruppen entsprechend der Anwendungspotenziale der Wärmepumpentechnologie unterteilen:

- Priorität 1 ($\bar{x}_k \geq 4$): Nahrung (4,2)
- Priorität 2 ($2 \leq \bar{x}_k < 3$): Chemie/Pharma (3,8), Papier (3,3), Maschinenbau & Textil (je 3,2)
- Priorität 3 ($\bar{x}_k < 2$): Metallerzeugnisse (2,7), Metalle (2,4), Mineralien (2,0)

Insbesondere der Nahrungsmittelindustrie wird eine große bis sehr große Bedeutung (89 %) zugeordnet. Dies ist auf die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten u. a. in Trocknungs- und Erwärmungsprozessen zurückzuführen. Die Chemie- und Pharmaindustrie sowie die Papierindustrie verpassen die Priorität 1 mit einem gewichteten Mittelwert von $\bar{x}_2 = 3,88$ respektive $\bar{x}_3 = 3,27$. Die Branchen mit einer Priorität 3 sind hinsichtlich der Anwendungspotenziale von Wärmepumpen gering einzuschätzen. Bspw. sind in der Branche Metalle große Abwärmepotenziale mit einem hohen Temperaturniveau vorzufinden, die direkt zur Deckung des Niedertemperatur-Wärmebedarfs eingesetzt werden können. Detaillierte Anwendungen von Wärmepumpen in Industriebetrieben werden in Kapitel 4 diskutiert.

Der größte Forschungsbedarf wird im erreichbaren Temperaturbereich der Wärmepumpe allokiert (Hersteller: 58 %, Wissenschaft: 19 %). Durch die Erschließung höherer Temperaturbereiche kann das Anwendungspotenzial der Wärmepumpe bspw. in der Papierindustrie vergrößert werden. Um höheren Temperaturbereich zu erschließen, ist die Weiterentwicklung bestehender Kältemittel notwendig. Dies wird mit 46 % als größter Forschungsschwerpunkt seitens der Wissenschaft identifiziert. Weiteren Forschungsbedarf seitens der Hersteller sehen die Befragten mit 42 % bei der Reduktion der Kosten (Investition, Unterhalt, Betrieb), dies kann u. a. durch die Entwicklung (modularer) Standardlösungen erreicht werden (Hersteller: 15 %). Weiteren Forschungsbedarf bei den Herstellern sehen die Befragten im Bereich der Effizienzsteigerung (27 %). Zur Steigerung der Effizienz ist eine Weiterentwicklung und Optimierung der Komponenten erforderlich. Hier sehen die Experten vor allem bei der Wissenschaft Forschungsbedarf (18 %).

Die identifizierten Hemmnisse lassen sich in die drei Kategorien „Kenntnisse und Informationen“, „Kosten“ und „Technologie und Prozess“ gruppieren. Das größte Hemmnis sind nach Einschätzung der Teilnehmer die niedrigen Energiepreise (37 %). Weitere besonders relevante Hemmnisse sind die Anforderungen an die Amortisationszeit seitens der Industrieunternehmen, die hohen Investitionen sowie die fehlende Produktakzeptanz (je 22 %). Entsprechend der Anzahl der Nennungen stellt die Kategorie Kosten (55 %) das größte Hemmnis dar, gefolgt von fehlenden Kenntnissen und Informationen (30 %). An letzter Stelle liegt die Kategorie Technologie und Prozesse (15 %). Dies zeigt, dass der im Vergleich zu den übrigen Segmenten geringeren Bedeutung der Wärmepumpen in ihrem typischen Temperaturfenster in der Industrie in erster Linie kein technisches Hemmnis zugrunde liegt.

Mögliche Handlungsoptionen um bestehende Hemmnisse zu lösen sind der Einsatz politischer und/oder regulatoriver Instrumente (bspw. Förderinstrumente, Marktanreizprogramme). Durch gezielte Informationskampagnen, die Erstellung von industriespezifischen Leitfäden für Wärmepumpen, die Aufbereitung von sonstigem Informationsmaterial und die Förderung von Installationen im Rahmen von wissenschaftlich begleiteten Pilot-Vorhaben kann die fehlende Produktakzeptanz der Wärmepumpentechnik in der Industrie gesteigert werden. Zur Erhöhung des technischen Anwendungspotenzials von Wärmepumpen in der Industrie ist Forschungsbedarf insbesondere im Bereich der Kältemittel sowie damit einhergehend mit dem möglichen Temperaturniveau einer Wärmepumpe notwendig.

3 Stand der Wärmepumpentechnik

Der Beginn der Wärmepumpentechnik liegt in der industriellen Wärmerückgewinnung. Die erste patentierte Wärmepumpe (Rittinger, 1855) wurde auf der Saline Ebensee in Österreich im Jahr 1857 in Betrieb genommen. Dennoch setzte sich die Wärmepumpentechnik zunächst in der Wärmeversorgung von neu gebauten Einfamilienhäusern (EFH) durch, da hier aus mehrerer Hinsicht günstige Bedingungen bestehen. Die zu erreichenden Vorlauftemperaturen sowie der notwendige Temperaturhub sind gering ($< 50\text{ °C}$). Zudem erlauben das vorhersagbare Verhalten von Wärmequelle (Umgebungswärme) und Wärmesenke (Gebäudeheizung, Warmwasser) die Entwicklung von standardisierten Serienprodukten. Dieses führte im Bereich der Einfamilienhäuser zu einer Reduktion von Investitions- und Transaktionskosten für die Integration von Wärmepumpen (Wolf et al., 2014). Ausgehend von diesem Markt wurde das Produktportfolio zunächst hin zu größeren Leistungen ausgedehnt, wodurch die Beheizung von Mehrfamilienhäusern (MFH), Bürogebäuden sowie andere gewerbliche Anwendungen wie die Beheizung von Schwimmbädern möglich wurden. Zugleich wurde das Temperaturlimit für die erzeugbare Wärme nach oben hin erweitert, so dass auch Altbauten, Niedertemperatur-Nahwärmenetze und einige Industrieanwendungen erschließbar wurden. Mit der Einführung neuer synthetischer Kältemittel und der Entwicklung von Hochdruckverdichtern für natürliche Kältemittel wurde das Temperaturlimit für die Anwendung von Wärmepumpen auf 110 °C angehoben. Die zukünftige Entwicklung der Wärmepumpentechnik zielt auf die Fernwärmeversorgung sowie die Erschließung weiterer Industrieprozesse bei Temperaturen bis zu 160 °C . Dieser Entwicklungspfad sowie die erschließbaren Anwendungsgebiete sind in Abbildung 3-1 skizziert.

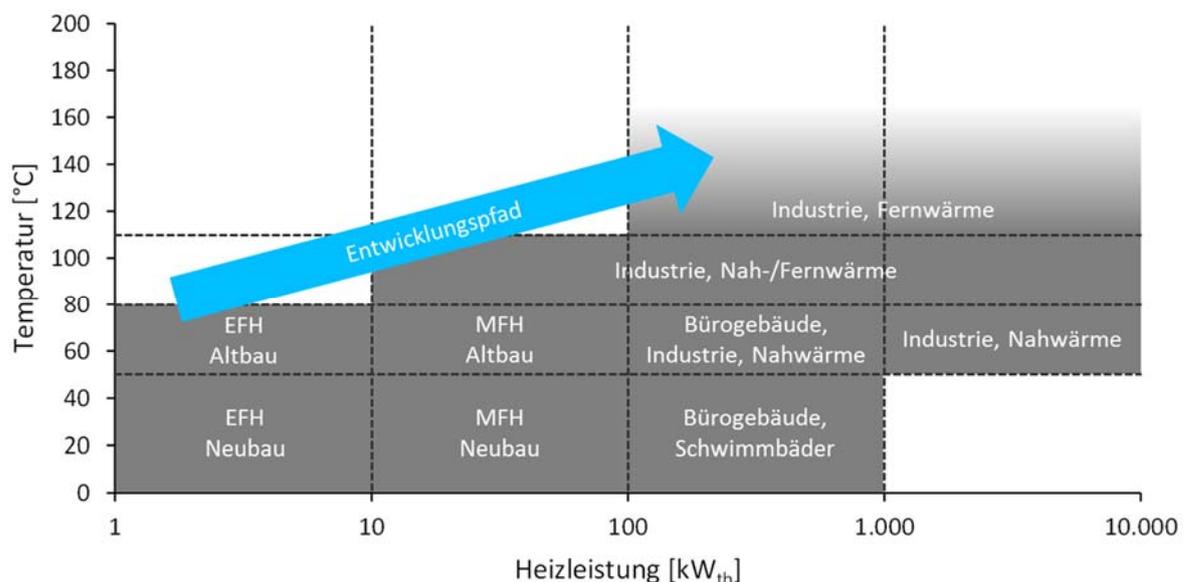


Abbildung 3-1: Entwicklung der Wärmepumpentechnik nach Anwendungsfeldern

Quelle: eigene Darstellung

Für die Versorgung der in Abbildung 3-1 dargestellten Anwendungsfälle kommen verschiedene Wärmepumpentechnologien in Frage. Im Folgenden wird insbesondere auf den heutigen Entwick-

lungsstand von Kompressions- und Absorptionswärmepumpen eingegangen, da diese die für industrielle Anwendungen relevanten Temperatur- und Leistungsbereiche abdecken. Zudem werden Entwicklungen an neuen Wärmepumpenprozessen beschrieben, die für den industriellen Einsatz geeignet sind. Adsorptionswärmepumpen hingegen werden nicht näher betrachtet, da diese nur mit kleinen Leistungen und niedrigen Wärmeerzeugungstemperaturen verfügbar sind und eignen sich vor allem für die Beheizung von Einfamilienhaus-Neubauten.

3.1 Kompressionswärmepumpen

In der Kaltdampf-Kompressionswärmepumpe (KWP) wird ein Kältemittel in einem linksläufigen Kreisprozess komprimiert und wieder entspannt (siehe Abbildung 3-2). Die Wärmeaufnahme erfolgt beim Verdampfen des Kältemittels auf niedrigem Temperatur- und Druckniveau. Der Kältemitteldampf wird dann mittels eines mechanischen Verdichters (z. B. Hubkolben, Schraube, Turbo) komprimiert. Mit der Erhöhung des Drucks steigt auch die Temperatur des Kältemittelgases. Im Verflüssiger wird Wärme auf dem erhöhten Temperaturniveau an die Wärmesenke abgegeben. Dabei kondensiert das Kältemittel. Das Kältemittelkondensat wird über das Expansionsventil entspannt. Der Kreis ist damit geschlossen.

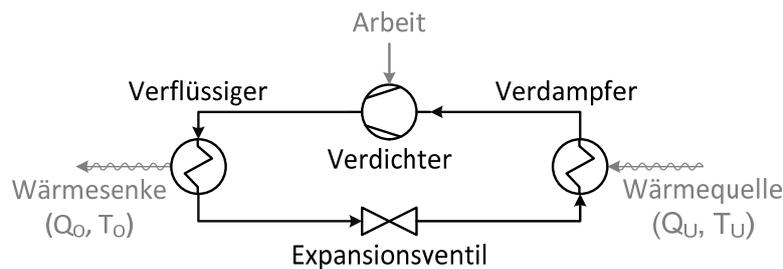


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Kompressionswärmepumpe

Quelle: (Wolf et al., 2014)

Stand der Technik: Die am Markt verfügbaren Kompressionswärmepumpen decken, wie Abbildung 3-7 dargestellt, eine große Bandbreite an Heizleistungen von 2 kW_{th} bis 20 MW_{th} ab. In Standard-Kompressionswärmepumpen werden häufig die Kältemittel R407C, R410A und R134a verwendet. In der Schweiz ist der Einsatz dieser Kältemittel in Großanlagen durch die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) reguliert (Bundesamt für Umwelt, 2016). Aufgrund der geringen kritischen Temperaturen von 87 °C (R407C) bis 101 °C (R134a) und der Tatsache, dass optimale Leistungszahlen bei Kondensationstemperaturen von 30 bis 40 K unterhalb der kritischen Temperatur erreicht werden (Reissner, 2015), beschränkt den Einsatzbereich dieser Wärmepumpen auf unter 80 °C. Die seit einigen Jahren auf dem Markt befindlichen Hochtemperaturwärmepumpen erreichen Temperaturen von bis zu 110 °C. Hier werden zum einen synthetische (R245fa) aber auch natürliche Kältemittel (R600a (Isobutan) oder R717 (Ammoniak)) verwendet, da diese höhere kritische Temperaturen aufweisen. Der erzielbare Temperaturhub beträgt pro Wärmepumpenstufe ca. 50 K. Höhere Temperaturhübe sind durch mehrstufige Anlagen realisierbar. Eine Ausnahme bildet R744 (CO₂), dessen kritische Temperatur bei 31 °C liegt. Daher wird R744 unter hohen Drücken im überkritischen Prozess eingesetzt. Durch die Wärmeabgabe im überkritischen Bereich entsteht ein

hoher Temperaturleit im Wärmeübertrager der Wärmesenkenseite, weshalb sich diese Wärmepumpen vornehmlich zur Erwärmung von Stoffströmen über ein großes Temperaturdelta eignen. Aufgrund hoher Kondensationsdrücke werden in Wärmepumpen mit R717 und R744 spezielle Hubkolben- oder Schraubenverdichter eingesetzt. Bei hohen Druckdifferenzen kann überdies der Einsatz einer Entspannungsturbine anstelle eines typischerweise verwendeten Expansionsventils sinnvoll sein (Austin und Sumathy, 2011).

Ausblick: Aufgrund des hohen Global Warming Potentials (GWP) der genannten synthetischen Kältemittel sind diese nur begrenzt zukunftsfähig. Anders als im Niedertemperaturbereich gibt es für Hochtemperaturanwendungen nur wenige Alternativen. In Labortests konnten für das Kältemittel R1336mzz-Z (GWP 9,4) die zuvor theoretisch ermittelten Eigenschaften (Kontomaris, 2014) bestätigt werden. So wurden im Labormaßstab Verdampfungstemperaturen von 90 °C und Kondensatontemperaturen von 150 °C erreicht (Fleckl et al., 21. Oktober 2015). Ähnliche Ergebnisse erzielte (Reissner, 2015) mit dem Kältemittel LG6 (GWP 1). Die nächsten Entwicklungsschritte für diese Prototypen sind Material- und Komponententests, die Optimierung der Kreisprozesse und die Vergrößerung der Anlagen. Mit der Entwicklung eines neuen zweistufigen Turboverdichters konnten (Larminat, 17. März 2015) mit R718 (Wasser) eine Kondensationstemperatur von 130 °C bei einer Heizleistung von 618 kW_{th} erreichen. Perspektivisch ist die Demonstration dieser Anlage in einem realen Produktionsprozess geplant. In Japan wurden mit einer Kombination aus klassischer Kompressionswärmepumpe und Brüdenverdichter bereits Dampftemperaturen von bis zu 165 °C bei einem Temperaturhub von 95 K erreicht (Kobe Steel Ltd. et al., 2011).

Die weitere Entwicklung der Kompressionswärmepumpen fokussiert sich folglich auf die Erreichung höherer Temperaturen und der Vergrößerung bisheriger Prototypen. Zu diesem Zweck müssen neue Komponenten entwickelt bzw. bestehende Komponenten an Temperaturen, Drücke und die chemischen Eigenschaften der verwendeten Kältemittel angepasst werden. Bei entsprechender Nachfrage ist damit zu rechnen, dass bis 2020 Wärmepumpen auf dem Markt erhältlich sind, die Temperaturen von bis zu 130°C oder gar 160 °C erreichen können. Im Bereich der bereits verfügbaren Hochtemperaturwärmepumpen bis 110 °C fehlen bisher messtechnisch dokumentierte und wissenschaftlich ausgewertete Anwendungsfälle.

3.2 Absorptionswärmepumpen

Die Absorptionswärmepumpe (AbWP) unterscheidet sich von der Kompressionswärmepumpe durch die Art der Verdichtung. Statt eines mechanischen Verdichters wird in der Absorptionswärmepumpen eine Apparatur aus Absorber, Pumpe und Austreiber verwendet. Der gasförmige Kältemitteldampf wird dem Absorber zugeführt wo das Kältemittel von einem flüssigen Lösungsmittel absorbiert wird. Die dabei auf einem mittleren Temperaturniveau freigesetzte Sorptionswärme kann in einer Wärmesenke genutzt werden. Das Lösungsmittelgemisch wird mit einer Pumpe auf ein höheres Druckniveau gehoben und in den Austreiber befördert. Hier wird das Kältemittel unter Zufuhr von Hochtemperaturwärme (> 100 °C) verdampft. Das Lösungsmittel wird über eine interne Wärmerückgewinnung und ein Entspannungsventil wieder zurück in den Absorber geleitet, während der Kältemitteldampf dem Verflüssiger zugeführt wird. Dort kondensiert das Kältemittel unter Wärmeab-

gabe an die Wärmesenke. In der Absorptionswärmepumpe wird folglich ein Wärmestrom von niedriger Temperatur durch Aufwendung von Antriebswärme mit hoher Temperatur auf ein mittleres Temperaturniveau gehoben.

Neben dem in Abbildung 3-3 beschriebenen Aufbau der Absorptionswärmepumpe vom Typ I besteht noch eine weitere Anlagenvariante, die Absorptionswärmepumpe Typ II, die auch als Wärmetransformator bezeichnet wird. Bei dieser Variante werden die Druckniveaus in der Anlage vertauscht, indem die Ventile durch Pumpen und die Pumpe durch ein Entspannungsventil ersetzt werden. So findet die Wärmehaufnahme aus der Wärmequelle auf einem höheren Druckniveau bei mittlerer Temperatur statt. Die Sorptionswärme wird im Wärmetransformator bei sehr hoher Temperatur abgegeben. In einem Wärmetransformator wird entsprechend ein Wärmestrom von mittlerer Temperatur aufgeteilt in einen kleinen Wärmestrom mit sehr hoher Temperatur und einen größeren Wärmestrom mit niedriger Temperatur.

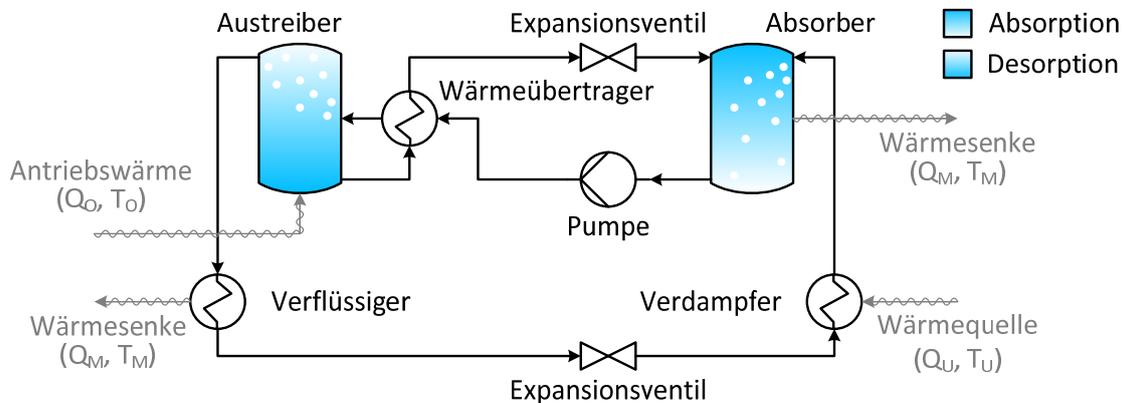


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Absorptionswärmepumpe (Typ I)

Quelle: eigene Darstellung nach (Wolf et al., 2014)

Stand der Technik: Absorptionswärmepumpen sind mit Nennheizleistungen von $25 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $20 \text{ MW}_{\text{th}}$ am Markt verfügbar. Standard-Absorptionswärmepumpen erreichen Temperaturen von bis zu 65 °C . Hochtemperaturanlagen können Wärme bei bis zu 90 °C liefern. Wärmetransformatoren mit großen thermischen Leistungen werden vereinzelt von Herstellern angeboten. Sie können mit einer Antriebswärme von 80 °C Wärmeströme von bis zu 115 °C bereitstellen. Die verwendeten Stoffpaarungen sind Wasser/Ammoniak und Lithiumbromid/Wasser. Die jeweils erstgenannte Komponente ist das Lösungsmittel, die letztgenannte ist das Kältemittel. Absorptionswärmepumpen mit dem Sorptionsmittel Lithiumbromid hatten in der Vergangenheit vielfach mit Korrosionsproblemen zu kämpfen. Durch die Zugabe von Korrosionsinhibitoren können metallische Oberflächen wirkungsvoll geschützt werden. Eine Überschreitung der Löslichkeitsgrenze ist dennoch unbedingt durch eine geeignete Regelungsstrategie sowie konstruktive Maßnahmen zu vermeiden. Der Einsatz von Absorptionswärmepumpen beschränkt sich auf Anwendungen in denen stetig verfügbare Abwärmeströme mit ausreichend hohen Temperaturniveaus vorhanden sind. Entsprechend existieren bisher kaum dokumentierte Demonstrationsanlagen.

Ausblick: Die Erforschung der Absorptionswärmepumpe konzentriert sich zum einen auf neue Stoffpaarungen für die Erreichung höherer Temperaturen und zum anderen auf effizientere Kreisprozesse. Als neue Lösungsmittel untersuchen (He et al., 2010) ionische Flüssigkeiten in Verbindung mit Wasser, Ethanol und Methanol als Kältemittel. Durch Tests an einem Prototypen konnten (Kim et al., 2012) das Zusammenspiel der ionischen Flüssigkeit (bmim)(PF6) mit den Kältemitteln R32, R125, R134a, R 143a und R152a analysieren und die theoretischen Überlegungen zur Eignung ionischer Flüssigkeiten belegen. Auf Seiten der Kreisprozesse wird die Nutzung mehrerer Verdampfungseffekte untersucht. Mit Mehreffektanlagen lässt sich die Leistungszahl von Absorptionswärmepumpen signifikant steigern. Allerdings werden für den Betrieb von Mehreffektanlagen Antriebswärmeströme mit höheren Temperaturen benötigt (Palacios Berche, Gonzales Palomino und Nebra, 2009). Eine einordnende Übersicht zu verschiedenen Anlagenkonzepten bieten (Kang, Kunugi und Kashiwagi, 2000).

Bezüglich der weiteren Entwicklung der Absorptionswärmepumpentechnik ist zu erwarten, dass eine Erweiterung des Leistungsspektrums hin zu kleineren Anlagen erfolgt. Zudem sind Steigerungen der Anlageneffizienz zu erwarten. Wie schnell in im Bereich der Absorptionstechnik Fortschritte erzielt werden können, hängt im starken Maße von der Marktentwicklung ab. Verglichen mit elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen ist das Interesse an Absorptionswärmepumpen bisher gering, was sich negativ auf die Entwicklungsanstrengungen der Hersteller auswirkt. Zudem teilen sich weniger Akteure den kleinen Markt.

3.3 Neue Wärmepumpentypen

Neben den etablierten Wärmepumpentechnologien wird an einigen weiteren technischen Implementierungen des Wärmepumpenprinzips geforscht. Diese Anlagen befinden sich derzeit noch im Prototypen- oder Demonstrationsstadium. Aufgrund ihrer Relevanz für industrielle Anwendungen werden im Folgenden vier Entwicklungen vorgestellt.

Hybrid-Wärmepumpe: Die Hybrid-Wärmepumpe (HyWP) ist eine Kombination von Kompressions- und Absorptionswärmepumpe. Der Kreisprozess einer Hybridwärmepumpe ist in Abbildung 3-4 schematisch dargestellt. Das Kältemittel wird bei niedrigem Druck unter Wärmezufuhr aus der Lösung verdampft und anschließend mit einem mechanischen Verdichter komprimiert. Das Lösungsmittel wird mittels einer Pumpe ebenfalls auf das höhere Druckniveau gehoben und mit dem Kältemittelgas im Absorber zusammengeführt. Hier wird Wärme mit hoher Temperatur an die Wärmesenke abgegeben. Die Lösung wird über eine interne Wärmerückgewinnung und einen Druckminderer wieder dem Austreiber zugeführt.

In Hybrid-Wärmepumpen wird zumeist die Stoffpaarung Wasser/Ammoniak eingesetzt. Durch die Mischung von Ammoniak und Wasser ist es möglich, die Anlage bei geringeren Kondensationsdrücken zu betreiben, als dieses bei vergleichbaren Kompressionswärmepumpen der Fall wäre. Durch das Mischungsverhältnis von Ammoniak und Wasser lässt sich zudem die Kondensationstemperatur beeinflussen. Damit kann im Wärmeübertrager auf der Wärmesenkenseite ein Temperaturgleit eingestellt werden, wodurch mit einer geringen mittleren Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager

gearbeitet werden kann. Aus den genannten Gründen können Hybrid-Wärmepumpen bessere Leistungszahlen erreichen als Kompressionswärmepumpen. Allerdings ist der Anlagenaufbau komplexer. Einen umfassenden Überblick über die Technologie bietet die Dissertation von (Nordtvedt, 2005). Auch an den Universitäten Hannover (Markmann und Kabelac, 2015), Graz (Zotter und Rieberer, 2014) und Lyngby (Jensen et al., 2015) wird an entsprechenden Anlagen geforscht. Einige Demonstrationsanlagen wurden bereits in verschiedenen Industriebranchen erfolgreich eingesetzt (Goget, 2012). Die bisher eingesetzten Anlagen haben Leistungen von $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $2,5 \text{ MW}_{\text{th}}$ und können Temperaturen von 115 °C erreichen.

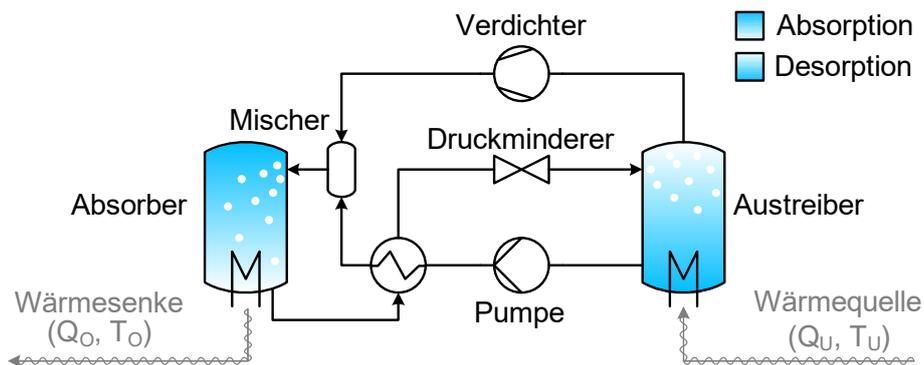


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Hybrid-Wärmepumpe

Quelle: eigene Darstellung nach (Wolf et al., 2014)

Thermoakustische Wärmepumpe: Die thermoakustische Wärmepumpe besteht aus einem Schallgenerator und einem gasgefüllten Resonator in dem eine stehende Welle erzeugt wird (siehe Abbildung 3-5). Die Wärmepumpe besteht aus einem Plattenpaket an dessen Enden jeweils ein Wärmeübertrager befestigt ist. Da in der stehenden Welle longitudinaler Transport und Kompression des Gasvolumens phasenverschoben stattfinden wird die Wärme vom Wärmeübertrager der Wärmequelle Stück für Stück in Richtung Wärmesenke transportiert. Auf diese Weise können sowohl hohe Wärmeerzeugungstemperaturen von mehr als 150 °C , als auch hohe Temperaturhübe von bis zu 80 K realisiert werden. Zudem ist der Aufbau dieser Anlage verhältnismässig einfach, weshalb mit geringen Investitionskosten zu rechnen ist (de Blok et al., 2011).

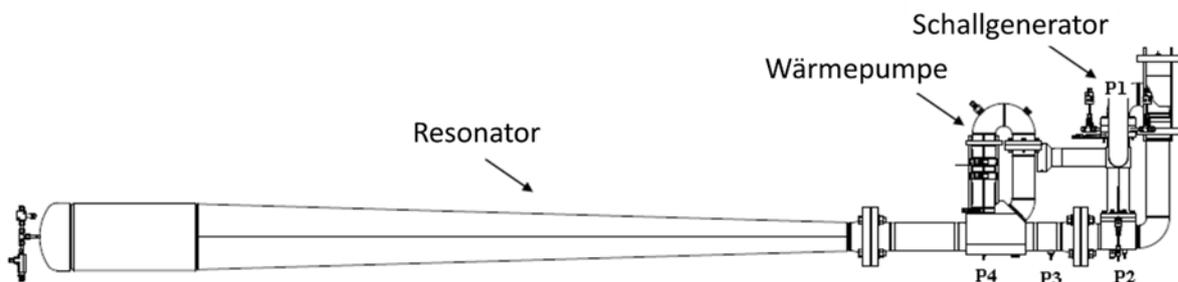


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der thermoakustischen Wärmepumpe

Quelle: (Tijani und Spoelstra, 2012)

Aufgrund fehlender beweglicher Komponenten ist der Wartungsaufwand zudem gering. Allerdings werden diese Vorteile mit einer geringen Anlageneffizienz erkaufte. Der Gütegrad einer Laboranlage wurde mit 0,26 gemessen⁹ (Vanapalli, Tijani und Spoelstra, 2010). Eine Steigerung des Gütegrads auf 0,4 erscheint den Autoren möglich. Noch befindet sich die thermoakustische Wärmepumpe im Prototypenstadium, aber die geringen Investitionskosten und die hohen erreichbaren Temperaturen lassen die Technologie für Anwendungen in der Prozessindustrie interessant erscheinen.

Rotationswärmepumpe: In der Rotationswärmepumpe rotieren mehrere gasgefüllte Rohrringe um eine gemeinsame Rotationsachse. Die Darstellungen in Abbildung 3-6 verdeutlichen diesen Aufbau. Durch die bei der Rotation entstehenden Fliehkräfte stellt sich ein Druckgradient im Rohrring ein. Wird nun das Gas im inneren des Rohrrings mittels eines Ventilators im Kreis geführt wird das Gasvolumen in den äußeren Bereichen verdichtet und in den inneren Bereichen wieder entspannt. Durch die Kompression erhöht sich die Temperatur des Gases in den äußeren Bereichen des Rohrrings. Dort wird die Wärme an eine Sammelschiene abgegeben, die die Wärme dann zur Wärmesenke leitet. Die Wärmeaufnahme aus der Wärmequelle erfolgt im inneren Bereich des Rohrrings. Da das Arbeitsmedium während des ganzen Prozesses gasförmig bleibt und kein Phasenwechsel stattfindet stellen sich sowohl auf der Wärmequellen- wie auch auf der Wärmesenkenseite Temperaturgleits in den Wärmeübertragern ein. Passen diese Temperaturgleits zu den Eigenschaften von Wärmequelle und Wärmesenke eines potenziellen Anwendungsfalls, kann mit der Rotationswärmepumpe nach Aussage der Erfinder (Adler und Riepl, 2015) eine Verdopplung der Leistungszahl¹⁰ erreicht werden. Der Temperaturhub kann durch die Variation der Rotationsgeschwindigkeit an die Anforderungen der Wärmequelle angepasst werden. Die maximal erreichbare Temperatur beträgt 150 °C. Die Technologie befindet sich noch im Prototypenstadium. Eine erste Demonstrationsanlage mit einer Nennheizleistung von 700 kW_{th} befindet sich derzeit in der Planung (Adler und Mauthner, 2016).

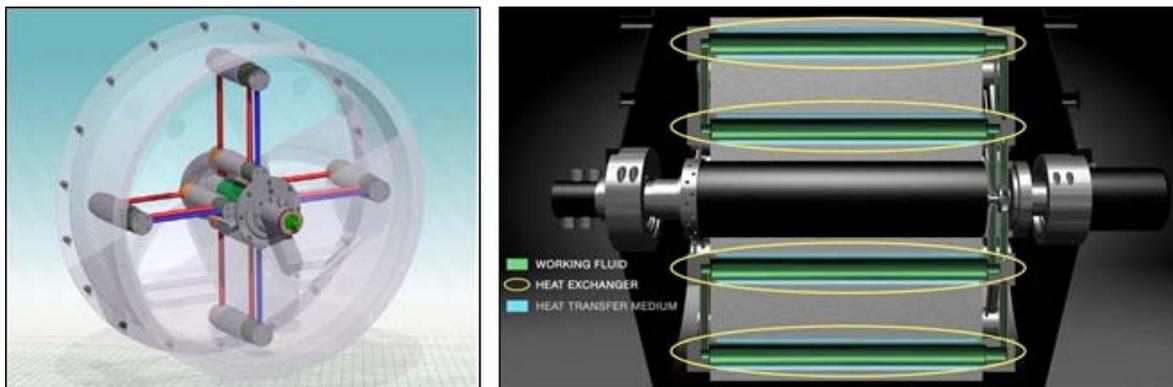


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Rotationswärmepumpe

Quelle: (Adler, Riepl und Ponweiser, 2011), (Adler und Riepl, 2015)

⁹ Klassische Kaldampfkompressionswärmepumpen erreichen Gütegrade von 0,45 bis 0,65

¹⁰ Im Vergleich zu einer Kaldampfkompressionswärmepumpe mit dem natürlichen Kältemittel R717 (Ammoniak)

3.4 Zusammenfassung und Marktübersicht

Mit aktueller Wärmepumpentechnik können in einem großen Leistungsspektrum Temperaturen von bis zu 110 °C erreicht werden. Damit können die Bedürfnisse der Industrie hinsichtlich der Heizleistungen sowie der erreichbaren Temperaturen zum Teil bereits erfüllt werden. Eine aggregierte Übersicht über die verfügbare Wärmepumpentechnik bietet Abbildung 3-7.

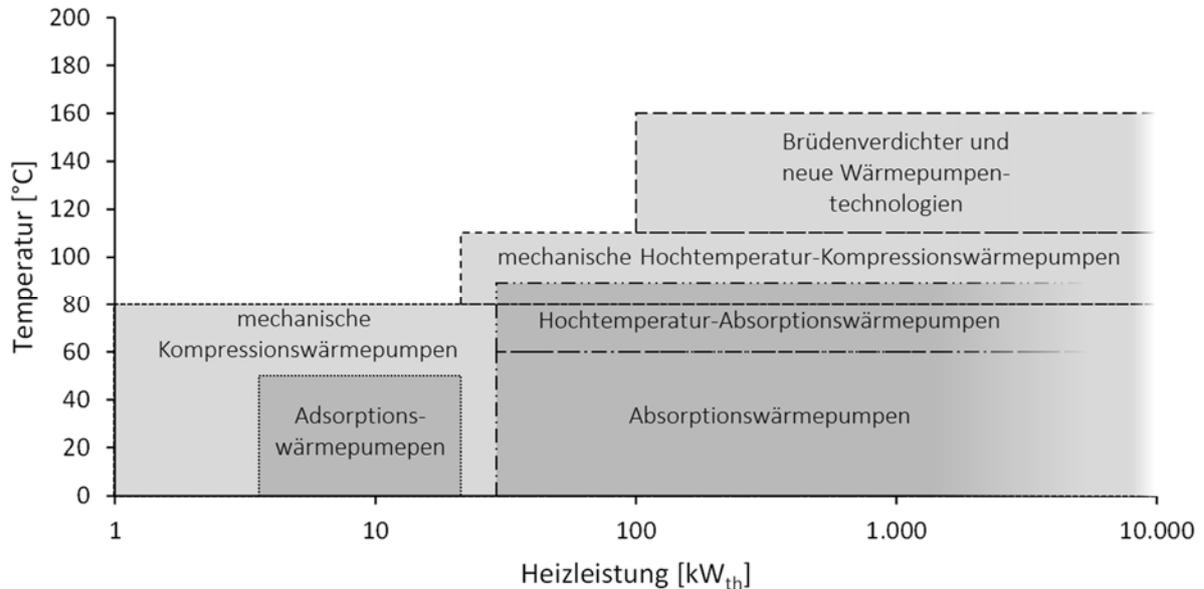


Abbildung 3-7: Anwendungsbereiche verschiedener Wärmepumpentypen

Quelle: eigene Darstellung

Für industrielle Anwendungen geeignet sind vornehmlich Kompressions- und Absorptionswärmepumpen. Eine Übersicht zu den Eigenschaften dieser Wärmepumpentechnologien ist in Tabelle 3-1 gegeben.

Tabelle 3-1: Übersicht der Eigenschaften von Kompressions- und Absorptionswärmepumpen

| Kategorie | Kompressionswärmepumpe | Absorptionswärmepumpe |
|--|--|---|
| Antrieb | Elektro-/Verbrennungsmotor | Abwärme, Gas-/Ölbrenner |
| Nennheizleistung | 2 kW _{th} bis 20 MW _{th} | 25 kW _{th} bis 20 MW _{th} |
| max. Temperatur | 110 °C | 90 °C |
| max. Temperaturhub pro Stufe | 50 K (70 K) | 50 K |
| Leistungszahl bei 40 K Temperaturhub | 3,9 bis 4,9 | 1,2 bis 1,5 |
| mittlere Lebensdauer | 20 Jahre | 18 Jahre |
| Investition inkl. Installation (500 kW _{th}) | 450 bis 700 EUR/kW _{th} | 500 bis 800 EUR/kW _{th} |
| Investition inkl. Installation (10 MW _{th}) | 250 bis 400 EUR/kW _{th} | 300 bis 450 EUR/kW _{th} |

Quelle: eigene Darstellung

Kompressionswärmepumpen werden zumeist durch Elektromotoren angetrieben. Ein Antrieb über Verbrennungsmotoren ist ebenfalls möglich, aber selten anzutreffen. Das Leistungsspektrum reicht von 2 kW_{th} bis $20 \text{ MW}_{\text{th}}$. Der maximale Temperaturhub pro Wärmepumpenstufe beträgt 50 K . Aufgrund der besonderen Eigenschaften des überkritischen Prozesses können Wärmepumpen mit dem Kältemittel R744 auch höhere Temperaturhübe realisieren. Allerdings sind hier die in Abschnitt 3.1 genannten Besonderheiten zu berücksichtigen. Die Leistungszahl der Kompressionswärmepumpe ist stark abhängig von dem zu überwindenden Temperaturhub. Die mit heutiger Technik erreichbaren Bereiche sind in Abbildung 3-8 angegeben. Die spezifischen Investitionskosten für elektrische Kompressionswärmepumpen liegen inklusive der Installationskosten bei 250 bis $700 \text{ EUR/kW}_{\text{th}}$.

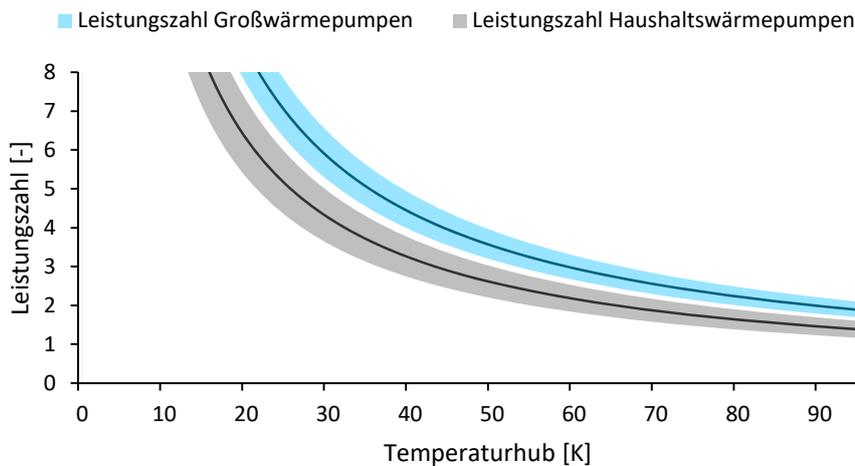


Abbildung 3-8: Erreichbare Leistungszahlen für Kompressionswärmepumpen in Abhängigkeit des Temperaturhubs

Quelle: eigene Darstellung

Absorptionswärmepumpen werden von wenigen Herstellern und mit vorwiegend großen Wärmeenergieleistungen im MW_{th} -Bereich angeboten. Die Leistungszahlen sind deutlich niedriger als bei Kompressionswärmepumpen (siehe Tabelle 3-1). Wird die Absorptionswärmepumpe aber durch Abwärme angetrieben kann dieser Effizienznachteil vernachlässigt werden. Die spezifischen Investitionskosten der Absorptionswärmepumpe liegen etwas über denen der elektrischen Kompressionswärmepumpe. Einen detaillierten Überblick über das Angebot ausgewählter Wärmepumpenprodukte für industrielle Anwendungen bietet Tabelle 3-2.

Perspektivisch ist für die Wärmepumpentechnik eine weitere Steigerung der erreichbaren Temperaturen auf 130 °C oder gar 160 °C bis zum Jahr 2020 zu erwarten. Eine darüber hinausgehende Erhöhung der erreichbaren Temperaturen erscheint zunächst nicht notwendig, da geeignete Wärmequellen in der Industrie zumeist ein Temperaturniveau von 20 bis 60 °C aufweisen. Ein anheben der Zieltemperatur führt folglich auch zur Vergrößerung der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke. Damit sinkt die Leistungszahl, was sich negativ auf die Effizienz aber auch auf die Betriebskosten der Wärmepumpe auswirkt. Hinsichtlich der Effizienz bestehen noch signifikante Steigerungspotenziale in der Entwicklung neuer Wärmepumpenprozesse und der Verbesserung von Komponenten klassischer Kompressionswärmepumpen.

Tabelle 3-2: Marktübersicht ausgewählter Hersteller und Produkte für den industriellen Einsatz

| Hersteller | Produkt | Kältemittel | maximale Vorlauf-temperatur | Nennheizleistung [kW _n] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--|--|--|
| | | | | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1.000 | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 5.000 | 6.000 | 7.000 | 8.000 | 9.000 | 10.000 | 20.000 | | | |
| CTA AG | CTAexklusiv | R134a | 65 °C (63 °C) | 2 kW bis 4000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ENGIE Refrigeration | L7 GH [...] PP Schraube | R717 | 65 °C | 111 kW bis 1.102 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Spectrum | R134a | 65 °C | 157 kW bis 502 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | HW | R134a | 80 °C | 20 kW bis 5.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CombiTherm | Sonderanfertigung | R245fa | 100 °C | 20 kW bis 300 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Unitop | diverse | 90 °C | 2.000 kW bis 20.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GEA Refrigeration | Grasso FX P | R717 | 82 °C | 300 kW bis 15.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Grasso FX-G | R717 | 82 °C | 200 kW bis 1.500 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Kolben-WP 50 bar | R717 | 80 °C | 230 kW bis 450 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | YLCS | R134a | 70 °C | 400 kW bis 2.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Johnson Controls | Pal Mag | R245fa | 105 °C | 1.000 bis 1.400 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | HeatPAC | R717 | 90 °C | 300 kW bis 1.800 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | YK | R134a | 70 °C | 1.000 kW bis 9.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | CYK | R134a | 68 °C | 2.500 kW bis 7.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Titan OM | R134a | 90 °C | 5.000 kW bis 20.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | EX series | k. A. | 60 °C | 900 kW bis 20.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| JCI - Hitachi | ThermoDynamix | k. A. | 70 °C | 200 kW bis 1.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| KKT Chillers | Sonderanfertigung | diverse | 80 °C | 100 kW bis 1.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Vitocal 350-G Pro | R134a | 73 °C | 27 kW bis 197 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| KWT Viessmann | Vitocal 350-G Pro Screw | R134a | 65 °C | 223 kW bis 1.128 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Sonderanfertigung | diverse | 65 °C | 15 kW bis 2.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ETW | R134a | 90 °C | 340 kW bis 600 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mitsubishi | Q-ton | R744 | 90 °C | 30 kW bis 480 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | IMWS[...]R2 | R134a | 65 °C | 105 kW bis 599 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ochsner | IMHS[...]ER3 | Öko 1 | 98 °C | 65 kW bis 634 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | IMHS[...]R2R3 | R134a/Öko1 | 98 °C | 176 kW bis 723 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Olion Scancool | Chill-Heat RE [...] | R410A | 65 °C | 110 kW bis 420 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Chill-Heat P [...] | R134a | 80 °C | 150 kW bis 380 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Chill-Heat S [...] | R134a | 67 °C | 180 kW bis 1200 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Robur | GAHP-W/S | R717 | 70 °C | 17 kW bis 44 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Star Refrigeration | Neatpump | R717 | 90 °C | 350 kW bis 8.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k. A. | R744 | 65 °C | 45 kW bis 200 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k. A. | diverse | 65 °C | 100 kW bis 500 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Durr thermea | thermeo2 | R744 | 90 °C (110 °C) | 51 kW bis 2.200 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Walter/Wettstein AG | k. A. | R717 | 75 °C (60 °C) | 300 kW bis 10.000 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Quelle: eigene Darstellung basierend auf (Wolf et al., 2014)

4 Anwendung von Wärmepumpen in Industriebetrieben

Die Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme stellt den Planer vor die Herausforderung einen Integrationspunkt zu finden, in dem der Einsatz einer Wärmepumpe zur Minimierung des Gesamtenergiebedarfs führt. Bei einfachen Systemen, in denen nur wenige Wärmequellen und Senken betrachtet werden müssen, kann anhand des in Abbildung 4-1 dargestellten Entscheidungsprozesses vorgegangen werden.

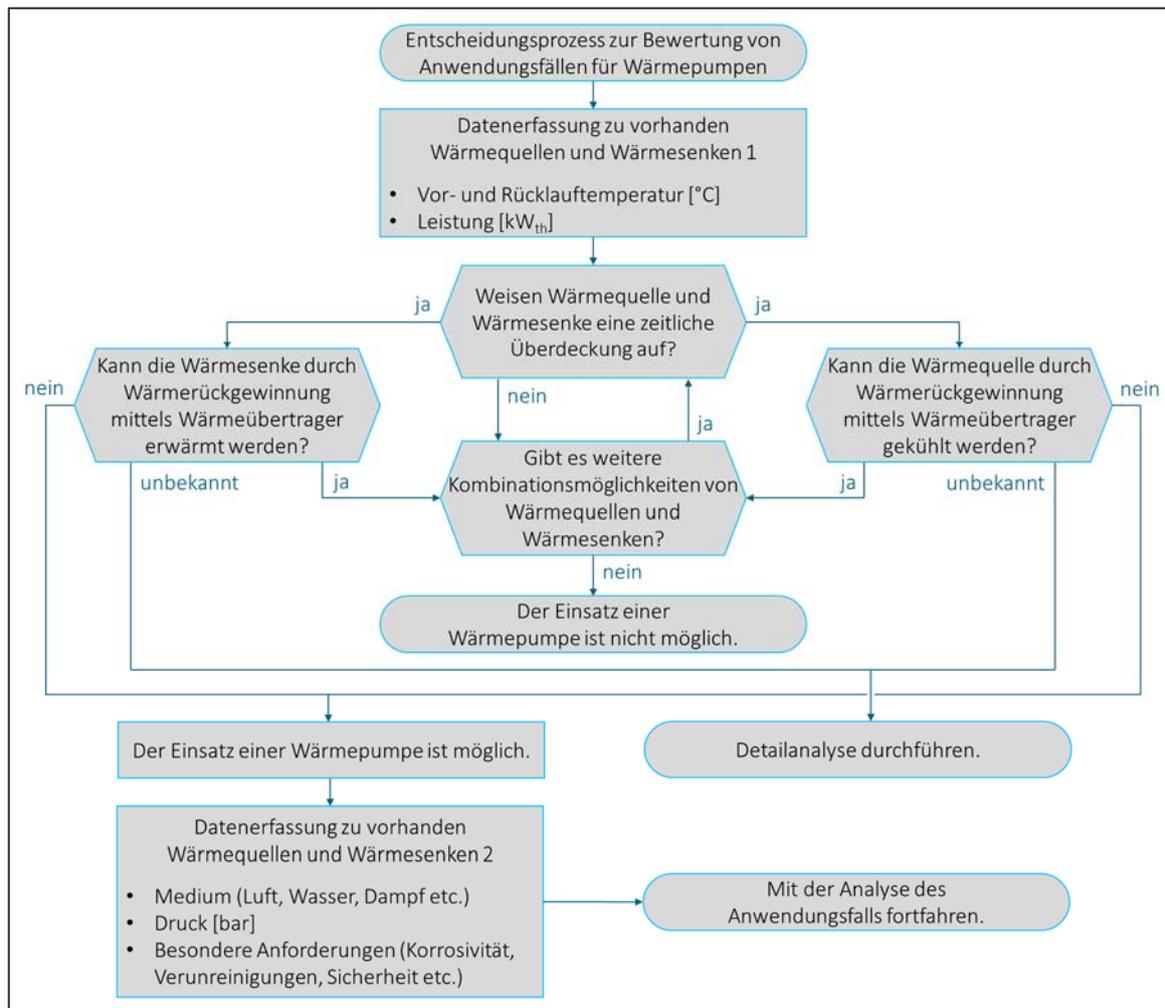


Abbildung 4-1: Flussdiagramm zur Bewertung von Anwendungsfällen für Wärmepumpen

Quelle: eigene Darstellung

Zunächst müssen im Betrieb Daten zu Temperatur und Leistung von Wärmequellen und -senken aufgenommen werden. Für alle in Frage kommenden Wärmequellen und -senken muss geprüft werden, ob die Versorgungsaufgabe nicht durch einfache Wärmeübertragung erfüllt werden kann. Ist keine direkte Wärmeübertragung möglich, so besteht die Möglichkeit, dass eine Wärmepumpe eingesetzt werden kann. Mit dieser Heuristik werden die Ergebnisse einer Pinch-Analyse approximiert. Um die Integrierbarkeit einer Wärmepumpe abschließend zu prüfen, müssen für die betrachtete Kombination von Wärmequelle und -senke weitere Daten zu den Wärmeträgermedien,

den vorliegenden Drücken und zu besonderen Anforderungen hinsichtlich Korrosion, Verunreinigungen oder bestimmten Sicherheitsanforderungen erfasst werden. Da die korrekte Planung, Auslegung und Installation einer Wärmepumpe im industriellen Kontext eine komplexe Aufgabe darstellt, sollte in diesem Punkt ein sachverständiger Planer oder Wärmepumpenhersteller hinzugezogen werden. Mit den erfassten Daten können diese eine überschlägige Bewertung des potenziellen Anwendungsfalls vornehmen.

Bei einem komplexen industriellen Produktionssystem, das eine Vielzahl an Wärmequellen und -senken aufweist, ist der in Abbildung 4-1 beschriebene Vergleich von Wärmequellen und -senken nicht zielführend. In einem solchen Fall sollte eine Pinch-Analyse durchgeführt werden, um zu gewährleisten, dass die Integration einer Wärmepumpe zur Optimierung des Gesamtsystems beiträgt. Die Pinch-Analyse ist ein Verfahren zur Minimierung des Heiz- und Kühlbedarfs eines thermischen Systems. Für tiefere Informationen zur Pinch-Analyse sei hier auf das Grundlagenwerk (Brunner et al., 2015) oder auf die speziell auf Wärmepumpen bezogene Abhandlung (Wellig et al., 2014) verwiesen.

Um eine optimale Integration der Wärmepumpe zu erreichen, muss diese über den Pinch hinweg integriert werden. Konkret bedeutet dieses, dass weder Wärmequelle, noch Wärmesenke durch direkte Wärmeübertragung versorgt werden können. Zudem müssen die Temperatur der Wärmequelle unterhalb der Pinch-Temperatur und die Temperatur der Wärmesenke oberhalb der Pinch-Temperatur liegen. In Abbildung 4-2 ist dieser Zusammenhang noch einmal grafisch dargestellt. Der Pinch ist in den Abbildungen als waagerechte Linie dargestellt.

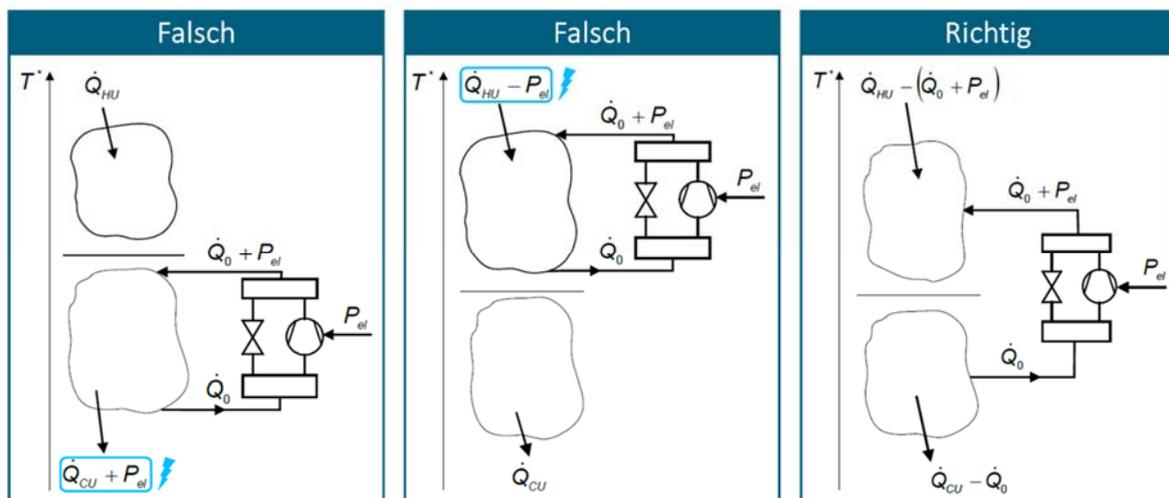


Abbildung 4-2: Richtige Integration einer Wärmepumpe mit Hilfe der Pinch Analyse

Quelle: eigene Darstellung basierend auf (Wellig et al., 2014)

Bei einer Integration der Wärmepumpe unterhalb des Pinch, führt die Antriebsleistung der Wärmepumpe aus Sicht des Gesamtsystems lediglich zu zusätzlichem Kühlbedarf. Wird die Wärmepumpe oberhalb des Pinch integriert, so wirkt lediglich die Antriebsenergie als zusätzliche Heizung. Bei der korrekten Integration der Wärmepumpe über den Pinch werden zugleich der Kühlbedarf wie auch der Heizbedarf um die Leistung der Wärmepumpe reduziert.

Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpenanlage hängt von einer Vielzahl an Parametern ab. Die bedeutendsten Einflussgrößen sind die erreichbare Arbeitszahl, das Verhältnis zwischen Strom und Gaspreis, die Investition, der gewählte Kalkulationszins und der Gütegrad bzw. die erreichbare Arbeitszahl der Wärmepumpe. Eine Orientierungshilfe zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpenanwendung bietet Abbildung 4-3. Als einflussreichste Parameter ist das Preisverhältnis von Strom zu Gas über den Temperaturhub zwischen Wärmequelle und -senke aufgetragen. Der Temperaturhub wurde gewählt, da die Leistungszahl und damit auch die Arbeitszahl, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, von der Temperaturdifferenz abhängt.

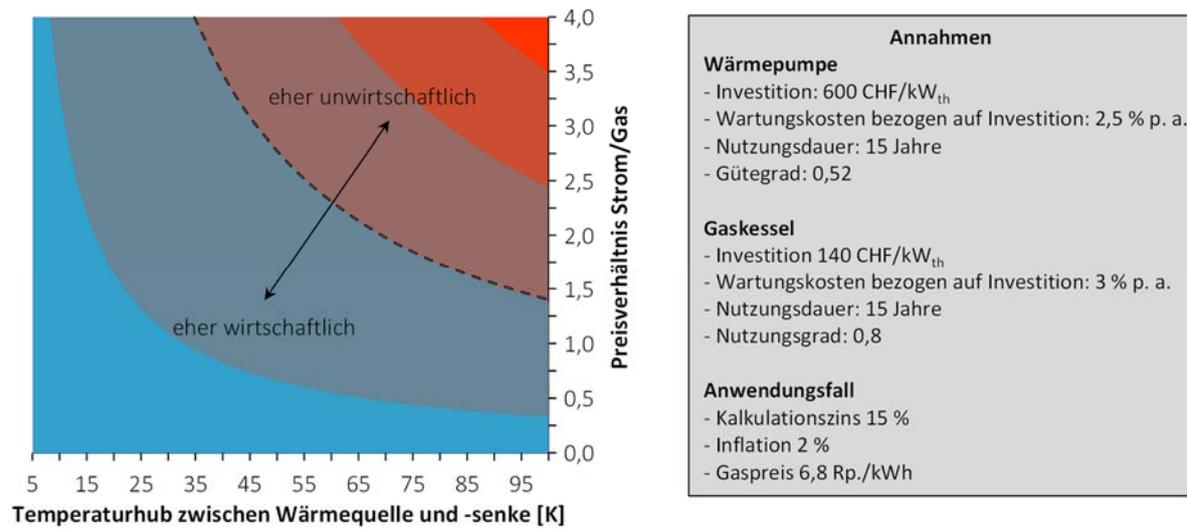


Abbildung 4-3: Wirtschaftlichkeitsabschätzung für die Wärmepumpenintegration (gestrichelte Linie für Kostenparität)

Quelle: eigene Darstellung

Um die Suche nach entsprechenden Wärmequellen und -senken zu erleichtern und die Rolle der Wärmepumpentechnik in der Schweizer Industrie einzuordnen, werden in den nachfolgenden Abschnitten die Anwendungsmöglichkeiten für Wärmepumpen in den verschiedenen Industriezweigen erläutert.

4.1 H. v. Nahrungs- und Futtermitteln, H. v. Getränken

Bezogen auf die Anzahl der Beschäftigten und den Umsatz beträgt der Anteil der Nahrungsmittelindustrie etwa 13 % der gesamten Industrie in der Schweiz. Bezogen auf den Endenergieverbrauch liegt der Anteil der Nahrungsmittelindustrie bei 15 %. Weitere Kenndaten zur Einordnung der Nahrungsmittelindustrie in der Schweiz sowie zur Aufgliederung des Endenergieverbrauchs dieses Industriezweigs sind in Abbildung 4-4 gegeben.

In der Nahrungsmittelindustrie werden 57 % der verbrauchten Endenergie für die Wärmeerzeugung eingesetzt. Der Großteil dieser Wärme wird bei Temperaturen unterhalb von 150 °C benötigt. Da mit verderblichen Waren gearbeitet wird, besteht zudem ein großer Kältebedarf. Auch die Pinch-Temperatur ist häufig in einem Bereich, der von Wärmepumpen abgedeckt werden kann. Relevante Wärmequellen in der Nahrungsmittelindustrie sind Kühlhäuser, Produktkühlungen, Fermentations-

prozesse, Abwässer, Abluft aus Trocknungsanlagen sowie Dampf aus Koch-, Eindampf- und Destillationsprozessen. Typische Wärmesenken sind die Raumwärme- und Warmwassererzeugung, die CIP-Anlage, Waschanlagen sowie Trocknungs-, Temperierungs-, Pasteurisierungs-, Koch-, Eindampf- und Destillationsprozesse. Von besonderer Bedeutung ist in der Nahrungsmittelindustrie der Einsatz von Wärmepumpen zur Nutzung von Abwärme aus Kälteanlagen. Die Umstellung auf Umluft-Trocknungsprozesse mit integrierter Wärmepumpe bietet den Vorteil, dass hier Wärmequelle- und Senke im selben Prozess vorliegen. Zudem können bei einigen Produkten Qualitätsverbesserungen erreicht werden. Beispielsweise können Aromen im Umlufttrockenverfahren besser erhalten werden. Eine Übersicht zu umgesetzten Wärmepumpenanlagen ist in Tabelle 4-1 gegeben. Die zahlreichen Beispiele unterstreichen die Relevanz der Wärmepumpentechnologie für diesen Industriezweig.

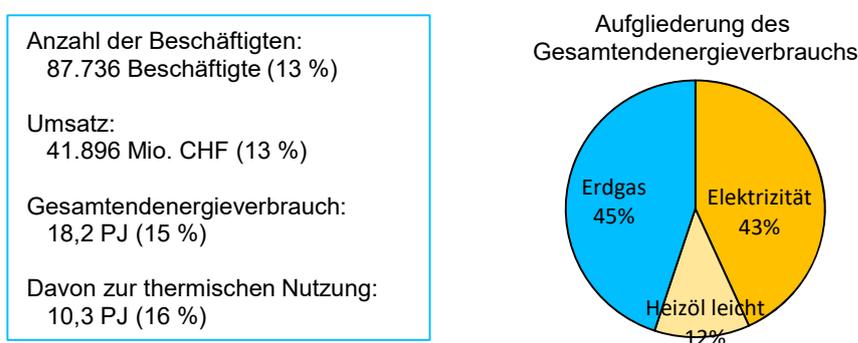


Abbildung 4-4: Quantitative Einordnung des Industriezweigs Nahrung gegenüber der gesamten Industrie in der Schweiz

Quellen: (Bundesamt für Statistik, 2016a), (Bundesamt für Statistik, 2016b), (Sauvin et al., 2016)

Tabelle 4-1: Überblick über Wärmepumpenanwendungen im Industriezweig Nahrung

| Industriezweig | Land | Typ | Leistung in kW _{th} | Wärmequelle | Wärmesenke |
|-----------------|------|-------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Schlachten [1] | CH | KWP | k. A. | Kälteanlage | Raumwärme, Warmwasser |
| Schlachten [2] | CH | KWP | 800 | Prozesskälte, Druckluft | Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme |
| Gemüse [3] | NL | KWP | 1.400 | Umluft Trockner | Umluft Trockner |
| Molkerei [4] | NO | St-WP | 400 | Eiswasser | Pasteurisierung |
| Schokolade [5] | UK | KWP | 1.250 | Prozesskälte | Raumwärme, Waschanlage, CIP |
| Brauerei [6][7] | AT | KWP | 370 | Kältemaschinen | Raumwärme, Warmwasser |
| Mälzerei [8] | DE | KWP | 3.250 | Darre Abluft | Darre Zuluft |

Quellen: [1] (Energieagentur der Wirtschaft (EnAW), 2007), [2] (thermea. Energiesysteme GmbH, 2013), [3] (De Kleijn Energy Consultants & Engineers, 2012), [4] (Single-Phase Power, 2013), [5] (Emerson Climate Technologies Inc., 2011), [6] (Huber, 2012), [7] (Cofely, 2014), [8] (Wolf et al., 2014)

4.2 H. v. Textilien, H. v. Bekleidung

Die Bekleidungs- und Textilindustrie spielt in der Schweizer Industrie lediglich eine untergeordnete Rolle. Für die wichtigsten Kenngrößen wie die Anzahl der Beschäftigten, den Umsatz sowie den Endenergieverbrauch beträgt der Anteil der Textil- und Bekleidungsindustrie bezogen auf den gesamten industriellen Sektor der Schweiz nur 1 bis 2 %. Der Endenergiebedarf teilt sich zu 41 % auf elektrische Energie, zu 38 % auf Erdgas und zu 21 % auf Heizöl auf. Von diesem Endenergieverbrauch werden 61% für die Erzeugung von Wärme eingesetzt. Die Kenndaten zur Einordnung der Bekleidungs- und Textilindustrie sind in Abbildung 4-5 gegeben.

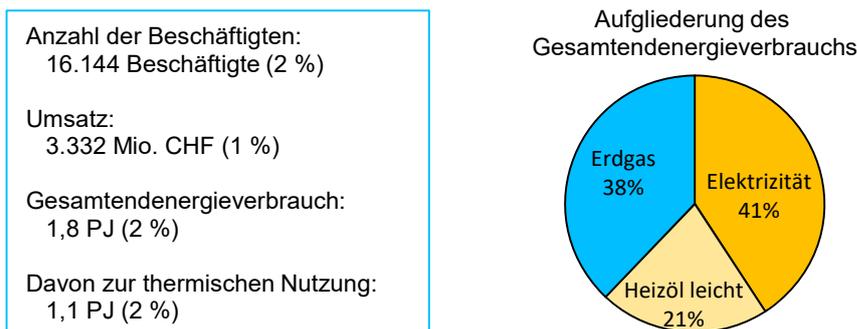


Abbildung 4-5: Quantitative Einordnung des Industriezweigs Bekleidung und Textilien gegenüber der gesamten Industrie in der Schweiz

Quellen: (Bundesamt für Statistik, 2016a), (Bundesamt für Statistik, 2016b), (Sauvin et al., 2016)

In der Textilindustrie existieren einige Prozesse im Temperaturbereich von 50 bis 130 °C, die mit heutiger oder zukünftiger Wärmepumpentechnik versorgt werden können. Dazu zählen Bleich-, Färbe-, Wasch- und Trocknungsprozesse sowie die Raumwärme- und Warmwassererzeugung. Als Wärmequelle kommt feuchtebeladene Abluft aus Färbemaschinen und Trocknern in Frage. Darüber hinaus generieren die Prozesse der Textilindustrie signifikante Abwassermengen, die ebenfalls als Wärmequelle dienen können. Aufgrund der Verunreinigung des Abwassers mit Faserstoffen, müssen für die Wärmerückgewinnung allerdings spezielle Wärmeübertrager eingesetzt werden. Beispiele für die Anwendung von Wärmepumpen in der Textil- und Bekleidungsindustrie sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Trotz vorhandener Anwendungsmöglichkeiten kann die Nutzung der Wärmepumpentechnik aufgrund des geringen Energieverbrauchs dieses Industriezweigs hier nur zu vernachlässigbaren Energieeinsparungen führen.

Tabelle 4-2: Überblick über Wärmepumpenanwendungen im Industriezweig Textil und Bekleidung

| Industriezweig | Land | Typ | Leistung in kW _{th} | Wärmequelle | Wärmesenke |
|--------------------------|------|-----|---------------------------------|-----------------------|------------|
| Textil [1] | DE | KWP | 137 | Abwärme Färbemaschine | Raumwärme |
| Textil u. Bekleidung [2] | NL | KWP | 252 | k. A. | k. A. |

Quellen: [1] (Wolf et al., 2014), [2] (HPT/iets Annex 35/13 Members, 2014)

4.3 H. v. Papier, Pappe und Waren daraus

Die Papierindustrie hat gemessen an den Indikatoren Beschäftigungszahl, Umsatz und Endenergieverbrauch einen Anteil von 5 bis 11 % am gesamten industriellen Sektor der Schweiz. Elektrizität macht etwa die Hälfte des Endenergieverbrauchs aus. Der übrige Endenergieverbrauch teilt sich auf Erdgas (25 %), Wärme aus WKK (18 %), Industrieabfall (6 %) und Heizöl (3 %) auf. Knapp 52 % des Endenergieverbrauchs werden für die Wärmeerzeugung aufgewendet. Eine Datenübersicht zur Einordnung des Industriezweigs ist in Abbildung 4-6 gegeben.

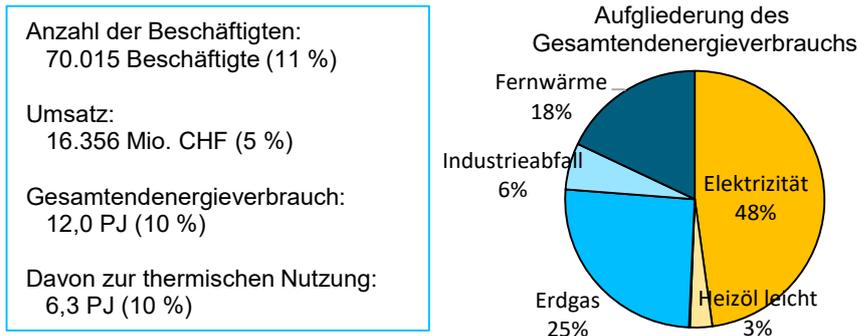


Abbildung 4-6: Quantitative Einordnung des Industriezweigs Papier gegenüber der gesamten Industrie in der Schweiz

Quellen: (Bundesamt für Statistik, 2016a), (Bundesamt für Statistik, 2016b), (Sauvin et al., 2016)

In der Papierindustrie erfolgt die Wärmezufuhr zumeist bei Temperaturen von 90 bis 200 °C. Auch der Prozesspinch ist vergleichsweise hoch. Daher bestehen für heutige Wärmepumpen wenige Anwendungspotenziale. Mit der zukünftig zu erwartenden Erweiterung des Temperaturspektrums tun sich aber auch in der Papierindustrie Wärmepumpenanwendungen auf. Möglich Wärmesenken sind dann die Trockenpartie, die Kalandermaschine, das Zellstoffkochen oder das De-Inking von Recyclingpapier. Als Wärmequelle dienen Abwässer und feuchtebeladene Abluftströme. In Tabelle 4-3 sind drei Anwendungsfälle aufgeführt in denen bereits Wärmepumpen in der Papierindustrie eingesetzt werden. Aufgrund des hohen Wärmebedarfs bestehen in der Papierindustrie signifikante Potenziale für die Anwendung von Wärmepumpen. Die Erweiterung des Temperaturspektrums der Wärmepumpentechnik nach oben führt zu einer Zunahme an möglichen Wärmepumpenanwendungen. Aufgrund der hohen Temperaturen, der verhältnismäßig geringen Energiepreise und der hohen Risikoaversion in der Papierindustrie sind die wirtschaftlichen Potenziale für die Anwendung von Wärmepumpen allerdings vorerst als gering einzuschätzen.

Tabelle 4-3: Überblick über Wärmepumpenanwendungen im Industriezweig Papier

| Industriezweig | Land | Typ | Leistung in kW _{th} | Wärmequelle | Wärmesenke |
|-------------------------------|------|-----|---------------------------------|----------------|----------------|
| Herstellung von Papier [1][2] | NL | KWP | 52 | Trocknerabluft | Trocknerzuluft |
| Herstellung von Papier [3] | DK | KWP | 4.000 | Trocknerabluft | Fernwärme |

Quellen: [1] (Institute for Sustainable Process Technology, 2014), [2] (Kermers und Brink, 2016),

[3] (HPT/iets Annex 35/13 Members, 2014)

4.4 H. v. chemischen Erzeugnissen, H. v. pharmazeutischen Erzeugnissen

Die Chemie- und Pharmaindustrie beschäftigt 11% der Angestellten der gesamten Schweizer Industrie. Der Umsatzanteil beträgt 29 %. Bezogen auf den gesamten Endenergieverbrauch des industriellen Sektors der Schweiz werden 23 % in der Chemie- und Pharmaindustrie verbraucht. Ungefähr 65 % der verbrauchten Endenergie werden in Form von Wärme benötigt. In Abbildung 4-7 ist eine Übersicht über die Bedeutung der Chemie- und Pharmaindustrie dargestellt.

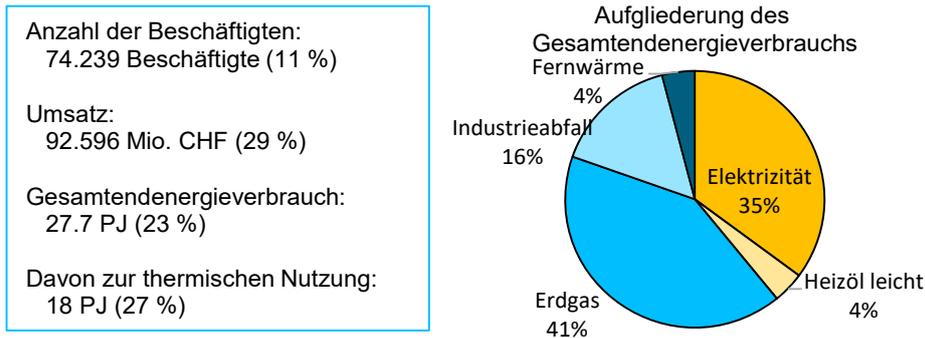


Abbildung 4-7: Quantitative Einordnung des Industriezweigs Chemie und Pharma gegenüber der gesamten Industrie in der Schweiz

Quellen: (Bundesamt für Statistik, 2016a), (Bundesamt für Statistik, 2016b), (Sauvin et al., 2016)

Die Produktionsprozesse der chemischen Industrie laufen zu großen Teilen bei Temperaturen oberhalb von 100 °C ab und sind daher mit heutiger Wärmepumpentechnik kaum zu erreichen. Darüber hinaus liegt auch der Prozesspinch bei vergleichsweise hohen Temperaturen. Mögliche Anwendungsgebiete für Wärmepumpen sind Trocknungs-, Extraktions-, Destillations-, Eindampf- und Kochprozesse. Eine größere Bedeutung kommt der Wärmepumpe in der Pharmaindustrie zu. Hier gelten zur Sicherung der Produktqualität hohe Standards für die Klimatisierung von Produktionshallen. Daher wird in der Pharmaindustrie ein bedeutender Anteil des Energiebedarfs für die Beheizung bzw. Kühlung der Produktionshallen aufgewendet. Hier besteht die Möglichkeit zur Anwendung von Wärmepumpen.

Tabelle 4-4: Überblick über Wärmepumpenanwendungen im Industriezweig Chemie und Pharma

| Industriezweig | Land | Typ | Leistung in kW _{th} | Wärmequelle | Wärmesenke |
|---------------------------|------|-------|---------------------------------|----------------------|--|
| Lacke und Farben [1] | DE | KWP | 240 | Pulverlackproduktion | Raumwärme |
| Klebstoffe [2] | NO | Hy-WP | 416 | Abwasserbehandlung | Auslauf Abwasserbehandlung Einlauf |
| Pflanzenextrakte [1] | DE | KWP | 62 | Extractor | Raumwärme |
| PP Kunststoffgranulat [3] | NL | BV | 5.800 | Destillation | Kopfprodukt Destillation Sumpf |

Quellen: [1] (Wolf et al., 2014), [2] (Goget, 20. November 2012), [3] (HPT/iets Annex 35/13 Members, 2014)

In Tabelle 4-4 sind vier Anwendungsfälle aus verschiedenen Subzweigen der Chemie- und Pharmaindustrie aufgeführt. Die Anwendung von Wärmepumpen in der Abwasserbehandlung sollte nur dann erwogen werden, wenn keine anderen Abwärmeströme für diese Aufgabe genutzt werden können.

4.5 H. v. Metallerzeugnissen, Maschinenbau

In Bezug auf die Anzahl der Beschäftigten und den Umsatz zählen die Metallverarbeitung und der Maschinenbau mit einem Anteil von über 30 % der wesentlichen Industriezweige der Schweiz. Aufgrund der geringen Energieintensität der Produktionsprozesse beträgt der Endenergieverbrauch dieser Industriezweige jedoch nur 17 % bezogen auf die gesamte Industrie der Schweiz. Der Endenergieverbrauch verteilt sich zu 63% auf Elektrizität, zu 22 % auf Erdgas und zu 15 % auf Heizöl. Knapp 37 % der verbrauchten Endenergie werden zur Wärmeerzeugung eingesetzt.

Im Maschinenbau entfällt ein Großteil des Wärmebedarfs auf die Beheizung von Büro- und Produktionsflächen. Darüber hinaus gibt es nur wenige thermische Prozesse, die in dem für Wärmepumpenanwendungen relevanten Temperaturbereich liegen und darüber hinaus einen relevanten Energieverbrauch aufweisen. Zu nennen wären hier Wasch-, und Trocknungsprozesse in der Teilereinigung. In der metallverarbeitenden Industrie kommen hier noch die Prozesse der Oberflächenbehandlung hinzu. Hier müssen Prozessbäder (z. B. Beizen, Entfettung, Phosphatierung, Galvanik) auf Temperaturen zwischen 30 und 100 °C gehalten werden.

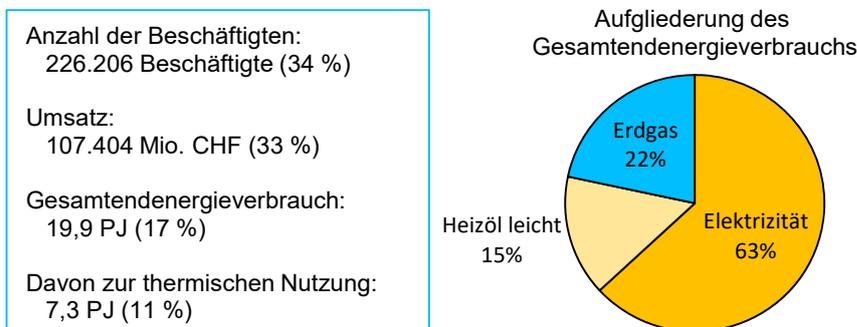


Abbildung 4-8: Quantitative Einordnung des Industriezweigs Metallerzeugnisse und Maschinenbau gegenüber der gesamten Industrie in der Schweiz

Quellen: (Bundesamt für Statistik, 2016a), (Bundesamt für Statistik, 2016b), (Sauvin et al., 2016)

In der elektrochemischen Oberflächenveredelung müssen die Galvanikbäder während des Prozesses gekühlt und im Leerlauf beheizt werden, um eine konstante Badtemperatur zu gewährleisten. Weiterhin relevant sind Lackierprozesse, in denen große Mengen an Wärme für die Lacktrocknung aufgewendet werden. Als Wärmequellen für diese Prozesse können Kälteanlagen dienen. Insbesondere dort wo Öfen, Galvaniken oder Laserschneidanlagen älteren Baujahrs eingesetzt werden besteht Kühlbedarf. Bei der Nutzung von Abwärme aus Laserschneidanlagen ist zu beachten, dass moderne Anlagen einen erheblich geringeren Kühlbedarf aufweisen. Während die Effizienz der Laser in alten Anlagen meist im einstelligen Prozentbereich liegt, wandeln heutige Laser mehr als 30 %

der Energie in Licht um. Da diese Wärmequellen überwiegend diskontinuierlich zur Verfügung stehen und zudem geringe Leistungen aufweisen, ist Nutzung eines zentralen Kühlkreislaufs von Vorteil. In Tabelle 4-5 sind einige Anwendungsfälle von Wärmepumpen im Industriezweig Metallherstellung/Maschinenbau aufgeführt.

Tabelle 4-5: Überblick über Wärmepumpenanwendungen im Industriezweig Metallherstellung und Maschinenbau

| Industriezweig | Land | Typ | Leistung in kW _{th} | Wärmequelle | Wärmesenke |
|---------------------------|------|------|---------------------------------|--|--|
| Maschinenbau [1] | DE | KWP | 20 | Laserschneidanlage, Erodiermaschine | Raumwärme |
| Metallverarbeitung [1] | DE | KWP | 274 | Laserschneidanlage | Raumwärme, Phosphatierung |
| Metallverarbeitung [1] | DE | AbWP | 194 | Serverkühlung, Laser- schneidanlage | Teilereinigungsanlage, Phosphatierung |
| Elektronikkabel [2] | AT | KWP | 140 | Abwärme Aluziehen | Raumwärme |
| Schrauben [1] | DE | KWP | 584 | Ofenkühlung | Raumwärme |
| Transformatoren [3] | JP | KWP | 110 | Galvanikbad | PW Trockner |

Quellen: [1] (Wolf et al., 2014), [2] (Ochsner GmbH, 2012), [3] (HPT/iets Annex 35/13 Members, 2014)

4.6 Übrige Industriezweige

Unter den übrigen Industriezweigen sind diejenigen Industrien gesammelt, denen in der Schweiz nur eine geringe Bedeutung zukommt oder die wenig relevant für die Anwendung von Wärmepumpen sind. Unter diese Definition fallen beispielsweise die Automobilproduktion, die Kunststoffverarbeitung, die Herstellung mineralischer Erzeugnisse (Zement, Glas etc.) oder die Metallherzeugung (siehe Abschnitt 2.2.1.4). Bezogen auf die gesamte Schweizer Industrie haben diese Industriezweige einen Anteil von 22 % an den Beschäftigten, 14 % am Umsatz und 18 % am Endenergieverbrauch. Dieser Endenergieverbrauch wird zu 62 % durch Elektrizität, zu 29 % durch Erdgas, zu 7 % durch Heizöl und zu 2 % durch Kohle gedeckt. Die wesentlichen Kennzahlen sind in Abbildung 4-9 grafisch aufbereitet.

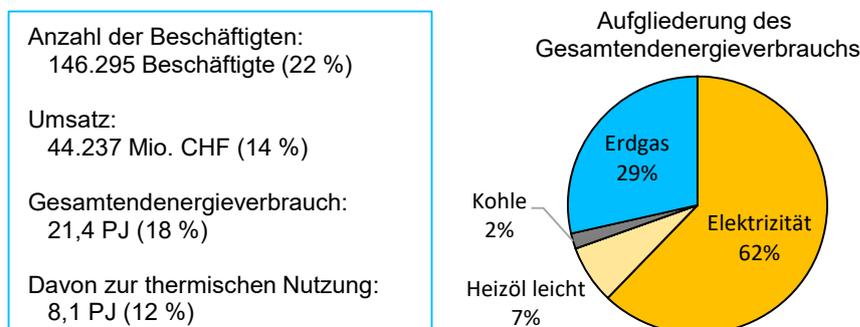


Abbildung 4-9: Quantitative Einordnung der übrigen Industriezweige gegenüber der gesamten Industrie in der Schweiz

Quellen: (Bundesamt für Statistik, 2016a), (Bundesamt für Statistik, 2016b), (Sauvin et al., 2016)

Die Automobilindustrie hat in der Schweiz eine untergeordnete Bedeutung. Dennoch bestehen hier Möglichkeiten für die Anwendung von Wärmepumpen. Innerhalb der Automobilindustrie stellt die Lackierung einen der energieintensivsten Produktionsschritte dar. Insbesondere in der Kathodischen Tauchlackierung ist der Einsatz von Wärmepumpen sinnvoll, da hier sowohl Wärme- (Trocknung) als auch Kälte (Lackierung) benötigt werden. In der Kunststoffverarbeitung muss das Kunststoffgranulat getrocknet werden, damit sich während des Spritzgießens keine Dampfblasen bilden können. Die Trocknung kann hier im Umluftverfahren unter Anwendung einer Wärmepumpe ablaufen. Ähnliche Anwendungen sind auch in der Ziegel Trocknung oder der Holz Trocknung möglich. Beispielanlagen, in denen diese Konzepte umgesetzt wurden, sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Überblick über Wärmepumpenanwendungen in den übrigen Industriezweigen

| Industriezweig | Land | Typ | Leistung in kW _{th} | Wärmequelle | Wärmesenke |
|--------------------|------|-----|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Lackieranlage [1] | JP | KWP | 566 | Lackieranlage Abluft | Lackieranlage Zuluft |
| Lackieranlage [2] | DE | KWP | 1.683 | Kathodische Tauchlackierung | Warmwasser für Prozesse |
| Elektromotoren [3] | DE | KWP | 90 | Spritzgießen | Raumwärme |
| Holz [1] | CA | KWP | 130 | Trocknerabluft | Trocknerzuluft |

Quellen: [1] (HPT/iets Annex 35/13 Members, 2014), [2] (Wolf et al., 2014), [3] (Sattler, 2012)

In den Industriezweigen Zement, Stahl und Glas werden große Energiemengen bei hohen Prozesstemperaturen eingesetzt. Diese Temperaturen können von Wärmepumpen nicht erreicht werden. Zudem liegen in den genannten Industriezweigen auch die Pinch-Temperaturen jenseits des Einsatzbereichs der Wärmepumpentechnik. Der vorhandene Wärmebedarf bei geringeren Temperaturen sollte daher vorwiegend durch Wärmerückgewinnung gedeckt werden.

5 Schlussbetrachtung

Die vorliegende Studie beantwortet die Frage nach der Bedeutung der Wärmepumpentechnik für den industriellen Sektor der Schweiz sowohl aus der Sicht der befragten Experten auf den Gebieten der Energie- und Wärmepumpentechnik, als auch aus der Auswertung der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur. Zusammenfassend ist festzustellen, dass in der Schweizer Industrie für die Wärmepumpentechnik eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten bestehen. Die Bedeutung des Marktsegments Industrie liegt unter derjenigen anderer Marktsegmente (z. B. Einfamilienhäuser). Der überwiegende Teil (55 %) der befragten Experten geht für industrielle Wärmepumpenanwendungen allerdings von einer positiven Marktentwicklung aus. Die Analyse des Stands der Wärmepumpentechnik und der Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie hat aufgezeigt, dass heute verfügbare Wärmepumpen bereits eine Vielzahl an Anwendungsfällen abdecken können. Bis zum Jahr 2020 ist mit einer weiteren Steigerung der erreichbaren Temperaturen auf 130 °C, eventuell sogar auf 160 °C, zu rechnen. Damit bestünde die Möglichkeit Wärmepumpen zur Dampferzeugung einzusetzen, was neue Anwendungsfelder in der Papier- und Chemieindustrie eröffnen würde. Allerdings ist bei allen möglichen Anwendungen zu beachten, dass die Integration der Wärmepumpe zur Optimierung des Gesamtsystems beiträgt.

Das größte Hemmnis für eine beschleunigte Marktdiffusion der Wärmepumpentechnik im industriellen Sektor ist in der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenanwendungen zu finden. Zum einen handelt es sich bei Großwärmepumpen um individuelle Sonderanfertigungen oder Produkte, die in sehr kleinen Losgrößen gefertigt werden. Durch größere Losgrößen ließen sich Produktivitätsgewinne aufgrund von Skaleneffekten realisieren. Ein Weg in diese Richtung wäre die stärkere Modularisierung der Wärmepumpen, so dass einige Teile des Kältekreises oder der hydraulischen Einbindung in größeren Stückzahlen gefertigt werden können. Soweit am Aufstellungsort genügend Bauraum verfügbar ist, könnten auch mehrere Standardwärmepumpen zu einer Großwärmepumpenanlage verschaltet werden. Zudem werden in der Industrie hohe Erwartungen an die Wirtschaftlichkeit (Amortisationszeit < 2 Jahre) von Investitionen gestellt. Da die Amortisation lediglich die Rücklaufzeit des eingesetzten Kapitals betrachtet und darüber hinausreichende zukünftige Gewinne vernachlässigt, ist dieser Indikator für primär für kurzfristig orientierte risikobehaftete Investitionen geeignet. Die Verwendung der internen Verzinsung oder des Life Cycle Costing (LCC) berücksichtigt diese zukünftigen Gewinne und ist daher für die Bewertung langlebiger Investitionen besser geeignet. Überdies bestehen auch politische Möglichkeiten in den Markt einzugreifen, sei es durch finanzielle Förderung (z. B. Investitionskostenzuschuss, Befreiung von Steuern und Abgaben) oder durch regulatorische Eingriffe (z. B. verpflichtende Effizienzziele, White Certificates).

Ein weiteres Hemmnis für die Verbreitung der Wärmepumpentechnik in der Industrie ist die unzureichende Verfügbarkeit von Informationen zu Anwendungsmöglichkeiten, Planung und Betrieb industrieller Wärmepumpenanlagen. Möglichkeiten dem entgegenzuwirken sind die Erstellung von Richtlinien, Fortbildungsprogramme für Anlagenplaner und Energieberater und die Bereitstellung von Informationsmaterialien auf einer Internetplattform. Die Durchführung dokumentierter Monitoring-Projekte ist dazu geeignet, das Vertrauen in die Technik zu steigern.

Auch wenn mit heutiger Wärmepumpentechnik bereits viele mögliche Anwendungsfälle abgedeckt werden, so fehlt es für einige Industriezweige noch an technischen Lösungen. Dieses gilt insbesondere für die Erweiterung des Temperaturspektrums. Diese Anforderung ist unmittelbar mit dem Erfordernis neuer Kältemittel verbunden. Mit natürlichen Kältemitteln sind höhere Temperaturen nur mit der Entwicklung von Verdichtern, die bei sehr hohen Drücken (> 80 bar) betrieben werden können, oder mit der Einführung neuer Wärmepumpenprozesse (Rotationswärmepumpe, thermoakustische Wärmepumpe) zu erreichen. Allerdings sind mit Kältemitteln wie R1336mzz-Z (GWP 9,4) oder Novec 649 (GWP 1) Stoffe verfügbar, deren geringes Treibhauspotenzial eine Verwendung auch in großen Wärmepumpenanlagen rechtfertigen würde.

Die identifizierten Hemmnisse werden in dem internationalen Forschungsprojekt IEA HPT Annex 48 „Industrial Heat Pumps“ (Laufzeit 04/2016 bis 04/2019) aufgegriffen, mit dem Ziel die Anwendung von Großwärmepumpen zu standardisieren. Hierzu werden die im Rahmen des IEA HPT/IEA Annex 35/13 gesammelten Anwendungsfälle ausgewertet und strukturiert aufbereitet, um daraus Richtlinien für die Integration von Wärmepumpen abzuleiten. Darüber hinaus werden Modelle für die Optimierung des Wärmepumpeneinsatzes erprobt. Die erzielten Ergebnisse sollen nach Projektende für Anlagenplaner sowie für Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft aufbereitet werden.

Letztlich bleibt festzustellen, dass in den kommenden Jahren mit einer wachsenden Bedeutung der Wärmepumpentechnik in der Industrie zu rechnen ist. Hinzu kommt die Markteinführung neuer Hochtemperaturwärmepumpen, die je nach Technologie Temperaturen von 130 °C oder sogar 160 °C erreichen können. Zusätzlich befördert wird der Einsatz der Wärmepumpentechnik durch einen allgemeinen Trend zur Dekarbonisierung der Energieversorgung. Aufgrund der geringen spezifischen CO₂-Emissionen des Schweizer Strommixes sind insbesondere elektrisch angetriebene Wärmepumpentechnologien geeignet, zu diesem Trend beizutragen.

Literaturverzeichnis

ADLER, B. und R. MAUTHNER, 2016. ECOP Rotationswärmepumpe auf Basis eines Joule Prozesses. Graz.

ADLER, B. und S. RIEPL, 2015. Industrielle ECOP Wärmepumpe und Kältemaschine mit Edelgas-kreislauf. Linz. VDI-Forum 2015.

ADLER, B., S. RIEPL und K. PONWEISER, 2011. Centrifugal compression turbo heat pump made by ECOP. In: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Hg. Proceedings of the 10th IEA Heat Pump Conference 2011: IEA Heat Pump Center.

AMARA, R.C. und A.J. LIPINSKI, 1971. Some views on the use of expert judgment [online]. Technological Forecasting and Social Change, 3, 279-289. ISSN 00401625. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0040-1625(71)80019-7

AUSTIN, B.T. und K. SUMATHY, 2011. Transcritical carbon dioxide heat pump systems [online]. A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(8), 4013-4029. ISSN 13640321 [Zugriff am: 16. Dezember 2016]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.rser.2011.07.021

Bell AG. Substitution Fernwärme mit Hochdruck Wärmepumpe, 2007. Zürich.

BERNTSSON, T. und P.A. FRANCK, 1997. Learning from experiences with industrial heat pumps. Sittard.

BRUNNER, F., P. KRUMMENACHER, B. WELLIG, P. LIEM, D. OLSEN, R. MORAND und D. HO-DEL, 2015. Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. Einführung in die Prozes-sintegration mit der Pinch-Methode Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen. Ittingen.

BUNDESAMT FÜR STATISTIK, 2016a. Beschäftigte nach Wirtschaftsabteilung, Beschäftigungs-grad und Geschlecht. Neuenburg.

BUNDESAMT FÜR STATISTIK, 2016b. Umsatz, Waren- und Materialaufwand nach Wirtschaftsab-teilungen (hochgerechnet). Neuenburg.

BUNDESAMT FÜR UMWELT, 2016. Kältemittel [online]. 27 September 2016 [Zugriff am: 16. De-zember 2016]. Verfügbar unter: [http://www.bafu.admin.ch/chemikalien/01415/01426/in-dex.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/chemikalien/01415/01426/index.html?lang=de)

COFELY, 2014. Wärme und Kälte effizienter nutzen. Hochtemperatur-Wärmepumpen von Cofely Kältetechnik machen die Nutzung erneuerbarer Energien noch effizienter. Machinery & Metalware, (1), 6.

DE BLOK, C. M., R.H. HUISMAN und MANS, W. P. C., 2011. Thermo Acoustic Power (TAP). con-versie industriële restwarmte naar elektriciteit. Eindrapportage fase II. Veessen.

DE KLEIJN ENERGY CONSULTANTS & ENGINEERS, 2012. Heat pump for drying of fries [online]. Industrial Heat Pumps [Zugriff am: 23. September 2014]. Verfügbar unter: http://www.industrialhe-atpumps.nl/en/practices/heat_pump_for_drying_of_fries/

- EDER, W., F. MOSER und B. KÖGL, 1979. Die Wärmepumpe in der Verfahrenstechnik. Wien: Springer Wien. ISBN 370912252X.
- EMERSON CLIMATE TECHNOLOGIES INC., 2011. Nestlé cutting costs with efficient waste heat recovery. Sidney (USA).
- FLECKL, T., M. HARTL, F. HELMINGER, K. KONTOMARIS und J. PFAFFL, 21. Oktober 2015. Performance testing of a lab-scale high temperature heat pump with HFO-1336mzz-Z as the working fluid. Nürnberg. European Heat Pump Symposium 2015.
- GOGET, R., 20. November 2012. Ammonia-Water Hybrid Heat Pumps. Economic integration and environmental benefits of high temperature Hybrid Heat Pumps. Hamar.
- HÄDER, M. und S. HÄDER, 1998. Neue Entwicklungen bei der Delphie-Methode. Literaturbericht II. ZUMA-Arbeitspapiere 98/05.
- HE, Z., Z. ZHAO, X. ZHANG und H. FENG, 2010. Thermodynamic properties of new heat pump working pairs [online]. 1,3-Dimethylimidazolium dimethylphosphate and water, ethanol and methanol. *Fluid Phase Equilibria*, 298(1), 83-91. ISSN 03783812. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fluid.2010.07.005
- HOFFMEYER-ZLOTNIK, J.H.P., 1992. Analyse verbaler Daten. Über den Umgang mit qualitativen Daten. Opladen: Westdt. Verl. ZUMA-Publikationen. ISBN 3-531-12360-2.
- HPT ANNEX 21 MEMBERS, 1995. Industrial Heat Pumps. Experiences, Potential and Global Environmental Benefits. Sittard.
- HPT/IETS ANNEX 35/13 MEMBERS, 2014. Application of Industrial Heat Pumps. IEA Industrial Energy-related Systems and Technologies Annex 13, IEA Heat Pump Programme Annex 35. Final Report. Hannover.
- HUBER, A., 2012. Prämiertes Projekt. Mohrenbrauerei. Wärmerückgewinnung aus dem NH₃-Kältekreislauf mittels einer Hochdruckwärmepumpe. Wien.
- INSTITUTE FOR SUSTAINABLE PROCESS TECHNOLOGY, 2014. ISPT project CATCH-IT wins NVKL Koeltrofee 2014. Amersfoort.
- JENSEN, J.K., W.B. MARKUSSEN, L. REINHOLDT und B. ELMGAARD, 2015. On the development of high temperature ammonia-water hybrid absorption-compression heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, (58), 79-89.
- KANG, Y.T., Y. KUNUGI und T. KASHIWAGI, 2000. Review of advanced absorption cycles: performance improvement and temperature lift enhancement. *International Journal of Refrigeration*, 23, 388-401.
- KERMERS, P. und G. ten BRINK, 2016. High Temperature Heat Pump. Recycling low value waste heat for steam production. Utrecht.
- KIM, S., Y.J. KIM, Y.K. JOSHI, A.G. FEDOROV und P.A. KOHL, 2012. Absorption Heat Pump/Refrigeration System Utilizing Ionic Liquid and Hydrofluorocarbon Refrigerants. *Journal of Electronic Packaging*, 134(3).

KOBE STEEL LTD., THE TOKYO ELECTRIC POWER CO. INC., CHUBU ELECTRIC POWER CO. INC. und THE KANSAI ELECTRIC POWER CO. INC., 2011. Overview of Steam Glow Heat Pump. Nagoya (Japan).

KONTOMARIS, K., 2014. HFO-1336mzz-Z: High Temperature Chemical Stability and Use as A Working Fluid in Organic Rankine Cycles. In: PURDUE UNIVERSITY, Hg. Proceedings of the 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette (USA).

LAMBAUER, J., U. FAHL, M. OHL, M. BLESL und A. VOß, 2008. Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele [Online]. Stuttgart. Verfügbar unter: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/Lambauer_IER_Forschungsbericht_Grosswaermepumpen.pdf

LARMINAT, P. de, 17. März 2015. A High Temperature Heat Pump Using Water Vapor as Working Fluid. Brüssel. ATMOSphere.

MARKMANN, B. und S. KABELAC, 2015. Untersuchung des Wärmeüberganges bei der Resorption/Kondensation ammoniakreichen Dampfes durch eine wässrige Ammoniak-Lösung. Dresden.

NORDTVEDT, S.R., 2005. Experimental and theoretical study of a compression/absorption heat pump with ammonia/water as working fluid. Dissertation. Trondheim (Norwegen).

OCHSNER, 2012. Referenz Großwärmepumpen. Haag.

PALACIOS BERCHE, R., R. GONZALES PALOMINO und S.A. NEBRA, 2009. Thermo-economic Analysis of a Single and Double-Effect LiBr/H₂O Absorption Refrigeration System. International Journal of Thermodynamics, 12(2), 89-96.

REISSNER, F., 2015. Development of a Novel High Temperature Heat Pump System. Dissertation. Erlangen.

RITTINGER, P., 1855. Theoretisch-praktische Abhandlung über ein für alle Gattungen von Flüssigkeiten anwendbares neues Abdampfverfahren mittels einer und derselben Wärmemenge welche zu diesem Behufe durch Wasserkraft in ununterbrochenen Kreislauf versetzt wird. Mit specieller Rücksicht auf den Salinenprozess dargestellt. Wien: Verlag Friedrich Manz.

SATTLER, P., 2012. Magna Auteca AG. Optimierung der Kälte- und Wärmeversorgung. Wien.

SAUVIN, L., R. SCHERER, M. FERSTER, J.G. STERZEL und S. MUFF, 2016. Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor. Resultate 2015. Bern.

SINGLE-PHASE POWER, 2013. Heat pumps for high temperature demand. European Heat Pump News, (1), 10-11.

THERMEA. ENERGIESYSTEME GMBH, 2013. Aufbruch in die 2000-Watt-Gesellschaft. Heiz- und Kühlprozesse effizient verbinden. Kälte, Luft, Klimatechnik (KI), (12), 36-37.

TIJANI, M.E.H. und S. SPOELSTRA, 2012. High temperature thermoacoustic heat pump. Vilnius.

VORGRIMLER, D. und D. WÜBBEN, 2003. Die Delphi-Methode und ihre Eignung als Prognoseinstrument. Statistisches Bundesamt: Wirtschaft und Statistik.

WELLIG, B., P. LIEM, D. OLSEN, L. GITZ und A. GRÜNIGER, 2014. Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse mit Hilfe der Pinch-Analyse. News aus der Wärmepumpenforschung.

WELTY, G., 1972. Communications. PROBLEMS OF SELECTING EXPERTS FOR DELPHI EXERCISES [online]. Academy of Management Journal, 15(1), 121-124. ISSN 0001-4273. Verfügbar unter: doi:10.2307/254805

VANAPALLI, S., TIJANI, M. E. H., SPOELSTRA, S., 2010. Thermoacoustic Stirling Heat Pump for Domestic Applications, in: American Society of Mechanical Engineers (ASME) (Hrsg.): Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (FEDSM-ICNMM2010). Montreal.

WOLF, S., U. FAHL, M. BLESL, A. VOß und R. JAKOBS, 2014. Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland. Forschungsbericht. FKZ 0327514A. Stuttgart.

ZOTTER, G. und R. RIEBERER, 2014. Steigerung der Energieeffizienz in Österreichs Industrie durch innerbetriebliche Abwärmenutzung mittels Wärmepumpensystemen anhand zweier Beispiele. Graz.

Anhang A: Umfrage Fragebogen



Umfrage Industrie- und Großwärmepumpen

Durchgeführt vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE in der Schweiz.

Kontaktdaten des Gesprächspartners

Vorname:

Nachname:

Funktion im Unternehmen:

Unternehmen:

Sektor (Industrie/Planer/Wissenschaft/Sonstige):

Fragen:

1. Wie schätzen Sie ihre Kenntnisse der Wärmepumpentechnik auf einer Skala von 1 (keine Kenntnisse) bis 5 (sehr gute Kenntnisse) ein?
2. Wie schätzen Sie ihre Kenntnisse zu Industrieprozessen auf einer Skala von 1 (keine Kenntnisse) bis 5 (sehr gute Kenntnisse) ein?
3. In welchen Industriezweigen kennen Sie sich besonders gut aus?
4. Bitte ordnen Sie die Bedeutung der Segmente Industrieprozesse, Wärmenetze, Büro- und Industriegebäude, Mehrfamilienhäuser, Einfamilienhäuser im Wärmepumpenmarkt auf einer Skala von 1 (keine Bedeutung) bis 5 (sehr große Bedeutung) ein.
5. Bitte geben Sie an welche Entwicklung Sie für die einzelnen Segmente des Wärmepumpenmarkts in der Schweiz in den nächsten fünf Jahren annehmen. Ordnen Sie bitte Ihre Annahme auf einer Skala von 1 (stark abnehmende Bedeutung) bis 5 (stark zunehmende Bedeutung) ein.
6. Bitte bewerten Sie das Anwendungspotenzial für Wärmepumpen in einzelnen Industriezweigen auf einer Skala von 1 (keine Bedeutung) bis 5 (sehr große Bedeutung) und machen Sie Angaben zur üblichen Wärmeversorgung und möglichen Wärmepumpenanwendungen.
7. Kennen Sie Wärmepumpenanwendungen in der Industrie, möglichst in der Schweiz, die Sie als „good“ oder „best practise“ bezeichnen würden? Wenn ja, machen Sie bitte Angaben zum Anwendungsfall (Ansprechpartner, Einsatzort, Anlagendaten (Wärmequelle, Wärmesenke, Leistung, Temperatur))?
8. Wo sehen Sie auf Seiten der Hersteller Bedarf für die Weiterentwicklung von Industrie- und Großwärmepumpen (z. B. Zuverlässigkeit, Hydraulikeinbindung, Korrosion, Wartungsintensität, Temperaturbereich, Leistungsspektrum, Effizienzsteigerung, Kostenreduktion)?

9. Wo sehen Sie auf Seiten von Universitäten und Forschungseinrichtungen Bedarf für die Weiterentwicklung von Industrie- und Großwärmepumpen (z. B. neue Kältemittel, neue Kreisprozesse, Optimierung von Komponenten (welche?), Umsetzung von Demonstrationsanlagen)
10. Was sehen Sie als die wesentlichen Hemmnisse für die Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie an?
11. Kennen Sie weitere Experten zur Wärmepumpentechnik bzw. der industriellen Wärmeversorgung, deren Meinung ebenfalls in dieser Umfrage erfasst werden sollte?
12. Haben Sie weitere Anmerkungen zur Wärmepumpenanwendung in der Industrie, die in dieser Studie Berücksichtigung finden sollen?

Aufbereitung der Ergebnisse:

Möchten Sie den Abschlussbericht mit den Ergebnissen dieser Umfrage zugeschickt bekommen?

Wären Sie interessiert an einem Workshop im Frühjahr 2017, im Rahmen dessen die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert werden, teilzunehmen?

Anhang B: Umfrageergebnis Rohdaten

| Frage1 & 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | SUMME |
|------------|---|---|---|----|----|-------|
| Frage 1 | 0 | 0 | 5 | 11 | 12 | 28 |
| Frage 2 | 0 | 1 | 8 | 10 | 9 | 28 |

¹ keine Kenntnisse

² geringe Kenntnisse

³ durchschnittliche Kenntnisse

⁴ gute Kenntnisse

⁵ sehr gute Kenntnisse

| Frage 3 | 0 | 1 | SUMME |
|-------------------|----|----|-------|
| Nahrung | 14 | 14 | 28 |
| Bekleidung/Textil | 23 | 5 | 28 |
| Papier | 19 | 9 | 28 |
| Chemie/Pharma | 16 | 12 | 28 |
| Mineralien | 25 | 3 | 28 |
| Metalle | 21 | 7 | 28 |
| Metallerzeugnisse | 20 | 8 | 28 |
| Maschinenbau | 13 | 15 | 28 |
| Übrige | 17 | 11 | 28 |

⁰ nein

¹ ja

| Frage 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | SUMME |
|---------------------------------|---|---|---|----|----|-------|
| Industrieprozesse | 0 | 6 | 8 | 8 | 6 | 28 |
| Wärmenetze | 0 | 6 | 3 | 10 | 9 | 28 |
| Büro- und Indust- riegebäude | 0 | 2 | 8 | 9 | 9 | 28 |
| Mehrfamilienhäuser | 1 | 0 | 5 | 7 | 15 | 28 |
| Einfamilienhäuser | 1 | 1 | 4 | 8 | 14 | 28 |

¹ keine Bedeutung

² geringe Bedeutung

³ durchschnittliche Bedeutung

⁴ große Bedeutung

⁵ sehr große Bedeutung

| Frage 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | SUMME |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Industrieprozesse | 0 | 0 | 12 | 9 | 6 | 27 |
| Wärmenetze | 0 | 0 | 8 | 10 | 9 | 27 |
| Büro- und Indust- riegebäude | 0 | 1 | 5 | 15 | 6 | 27 |
| Mehrfamilienhäuser | 0 | 2 | 5 | 13 | 7 | 27 |
| Einfamilienhäuser | 0 | 2 | 9 | 10 | 6 | 27 |
| <i>¹ stark abnehmende Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>² abnehmende Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>³ durchschnittliche Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>⁴ zunehmende Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>⁵ stark zunehmende Bedeutung</i> | | | | | | |

| Frage 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | SUMME |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Nahrung | 0 | 1 | 2 | 14 | 10 | 27 |
| Bekleidung/Textil | 2 | 3 | 4 | 9 | 1 | 19 |
| Papier | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 22 |
| Chemie/Pharma | 0 | 0 | 8 | 12 | 5 | 25 |
| Mineralien | 7 | 5 | 5 | 1 | 0 | 18 |
| Metalle | 3 | 10 | 7 | 1 | 1 | 22 |
| Metallerzeugnisse | 2 | 7 | 10 | 3 | 1 | 23 |
| Maschinenbau | 0 | 4 | 13 | 4 | 2 | 23 |
| <i>¹ keine Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>² geringe Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>³ durchschnittliche Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>⁴ große Bedeutung</i> | | | | | | |
| <i>⁵ sehr große Bedeutung</i> | | | | | | |

Frage 7

Die Antworten auf die Frage 7 werden im Rahmen der Auswertung berücksichtigt und in Kapitel 4 dokumentiert.

| Frage 8 | Anzahl Nennungen |
|--|------------------|
| Kältemittel | 2 |
| (Modulare) Standardprodukte | 4 |
| Zuverlässigkeit | 3 |
| Zustandsbasierte Wartung | 2 |
| Drehzahlregelung | 1 |
| Fernüberwachung | 1 |
| Temperaturbereich | 15 |
| Wärmeübertrager | 3 |
| Leistungsspektrum | 2 |
| Effizienz | 7 |
| Kosten (Investition, Unterhalt, Betrieb) | 11 |
| Steuerungs- und Regelungskonzepte | 2 |
| Kenntnisse über Hydraulik, Werkstofftechnik etc. | 3 |
| Fehlende Kenntnisse der Industrieprozesse | 1 |
| Informationsaufbereitung | 1 |
| SUMME | 58 |

| Frage 9 | Anzahl Nennungen |
|--|------------------|
| Kältemittel | 12 |
| Verdichtertechnologie (Turbokompressoren) | 2 |
| Injector Technologie für Ammoniak WP | 1 |
| Standardlösungen | 1 |
| Komponentenoptimierung | 4 |
| Demo-Anlagen | 3 |
| Teillastverhalten WÜT | 1 |
| Steuerungs- und Regelungskonzepte | 1 |
| Umsetzungsprojekte | 1 |
| Effizienz(-Kriterien) | 2 |
| Kreisprozesse | 3 |
| Mehrstufige Anlagen | 1 |
| Abwärmennutzung aus Abwasser | 1 |
| Temperaturbereich | 5 |
| Informationsaufbereitung (Markt/Potenziale/Leistungen) | 2 |
| Absorptionswärmepumpentechnik | 2 |
| Verfahrenstechnische Hilfestellung | 2 |
| Hilfe zur Marktintegration | 1 |
| SUMME | 45 |

| Frage 10 | Anzahl Nennungen |
|---|-------------------------|
| Zielkonflikt: Abwärmenutzung vs. Wärmepumpe | 1 |
| Eingriff in Prozess | 2 |
| Wirkungsgrad | 1 |
| Temperaturniveau | 3 |
| Energiepreise zu tief | 10 |
| Hohe Investitionskosten | 6 |
| Niedrige Amortisationsziele der Investoren | 6 |
| Keine LCC-Betrachtung | 1 |
| Hinderliche Besteuerungsmodelle von Strom | 1 |
| Hohe Betriebskosten | 2 |
| Mangel an Wissen über Möglichkeiten | 5 |
| Fehlendes Wissen der "Fachplaner" | 1 |
| Fehlende Angebote | 2 |
| Produktakzeptanz/Stellenwert | 6 |
| SUMME | 47 |

Frage11

Die Antworten auf die Frage 11 werden im Rahmen der Auswertung berücksichtigt, können aus Datenschutzrechtlichen Gründen aber nicht publiziert werden.

Frage 12¹

- Fragebogen 1 Geringe Volatilität im Strom → Zunahme; Frage der Speichermöglichkeiten; Speicherung mit u. a. Wärmepumpe und thermischen Speichern (große Wärmeleistung) → Stromspitzen glätten; Voraussetzung: intelligente Vernetzung
- Fragebogen 2
- Es fehlen die Kraftwerksbetreiber, Betreiber von Energiezentralen und Kehrriichtverbrennungsanlagen.
 - Nicht explizit angesprochen wurde die Abwärmenutzung ganzer Industriebetriebe (z.B. Kühlturmwasser von metallverarbeitenden Betrieben) und die Einspeisung in Fernwärmenetze. Ein Hinderungsgrund ist hier oft die Langzeitperspektive für das abwärmeliefernde Unternehmen (besteht das Unternehmen in 10 oder 20 Jahren noch).
- Fragebogen 3 Die Überschrift "WP-Anwendung in der Ind." ist sehr weit gefasst. Im Grunde kann jeder Absender nur sein (kleines) Einsatzfeld/Leistungsgröße bewerten; meine Antworten beziehen sich auf Erfahrungen mit WP zwischen 600 und 5000 kW Heizleistung
- Fragebogen 4 Kleine modulare Standardanlagen vs. große Individualanlagen

Frage 12¹

| | |
|---------------|--|
| Fragebogen 5 | Ein Strategiekonzept mit der Einbindung der Industrie (GKS) |
| Fragebogen 6 | <ul style="list-style-type: none"> • Förderung von gleichzeitiger Erzeugung von Kälte und Wärme bzw. Abwärmennutzung, für Wärmepumpen die Preise für elektrische Energie von Steuern und Umlagen befreien, ggf. Einrichtung eines geförderten WP Tarifs • Bewertung anhand der CO₂ Bilanz. • Zusammenarbeit des Wärmepumpenverbands mit dem Kälteanlagenbau (höhere Prozesskompetenz). • keine unkommentierte Übernahme von Effizienzen aus dem Gebäudewärmepumpenbereich → Andere Standards für Industrierärmepumpen |
| Fragebogen 7 | Sollte inzwischen eigentlich ein Selbstläufer sein! |
| Fragebogen 8 | Eher nicht Monitoring, Erfolgskontrolle laufend ist sehr wichtig und muss zu Beginn der Planung definiert werden |
| Fragebogen 9 | Eigenstromnutzung durch PV Anlage auf dem Dach (Industrie) in Verbindung mit der Verbrauchsoptimierung Wärmepumpe (stromseitig) |
| Fragebogen 10 | Datenlage in der Industrie meist schlecht bis sehr schlecht; Fachgerechte Planung Mangelware → daher Planer miteinbeziehen |
| Fragebogen 28 | Klare Unterscheidung "Prozess" und "Infrastruktur"; Prozessintegration immer mittels Pinch-Analyse, usw. |

¹ nicht aufgeführte Fragebögen habe die Frage 12 nicht beantwortet.

| Aufbereitung der Ergebnisse | 0 | 1 | SUMME |
|--------------------------------|---|----|-------|
| Interesse an Abschlussbericht | 0 | 28 | 28 |
| Interesse an Abschlussworkshop | 6 | 22 | 28 |

⁰ nein

¹ ja

Anhang C: Workshop „Industriewärmepumpen in der Schweiz“

Die Ergebnisse der Studie wurden im Rahmen eines Workshops einem Fachpublikum (u. a. Wärmepumpenhersteller, Anlagenplaner, Energieeffizienzberater, Wissenschaftler) vorgestellt. Veranstaltet wurde der Workshop am 20. März 2017 in den Räumen des Bundesamtes für Energie in Ittigen. Ziel des Workshops war die Kommunikation der Studienergebnisse und der fachliche Austausch zu Entwicklungsperspektiven und Hemmnissen für die Wärmepumpentechnik und zu Strategien für die weitere Verbreitung dieser Technologie im industriellen Sektor der Schweiz.

Workshop: „Industriewärmepumpen in der Schweiz“

Montag, 20. März 2017

Bundesamt für Energie, Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen

| | |
|---------------------|--|
| 14:00 Uhr | Begrüßung, Vorstellung des Ablaufs, Zielsetzung Rita Kobler – Bundesamt für Energie (BFE) Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart |
| 14:15 Uhr | Vorstellung der Studienergebnisse Stefan Wolf – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart |
| 14:40 Uhr | Integration von Wärmepumpen in Industrieprozesse mit der Pinch-Methode Prof. Dr. Beat Wellig – Kompetenzzentrum Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, Hochschule Luzern – Technik & Architektur |
| 15:05 Uhr | Anwendung von Wärmepumpen in Industrie und Gewerbe Theo Studer – CTA AG |
| 15:30 Uhr | Kaffeepause |
| 15:45 Uhr | Anwendung von Wärmepumpen in Wärmenetzen Ulrich Pietrucha, Dr. Leszek Wojtan – Friotherm AG |
| 16:10 Uhr | Moderierte Diskussion zu den Randbedingungen für eine weitere Verbreitung der Wärmepumpentechnik in der Industrie |
| 16:45 Uhr | Zusammenfassung und Schlussworte Rita Kobler – Bundesamt für Energie (BFE) Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart |
| ab 17:00 Uhr | Apéro |

Im Anschluss an den Workshop wurde den Teilnehmern die Möglichkeit gegeben anonym auf Handlungsbedarfe hinzuweisen. Die gesammelten Hinweise können in die fünf Kategorien F&E (Grundlagen), F&E (Anwendung), Gesetzgebung, Förderung und Informationsbedarf eingeordnet werden. Die Häufigkeit der Nennungen ist in Abbildung C-1 dargestellt.

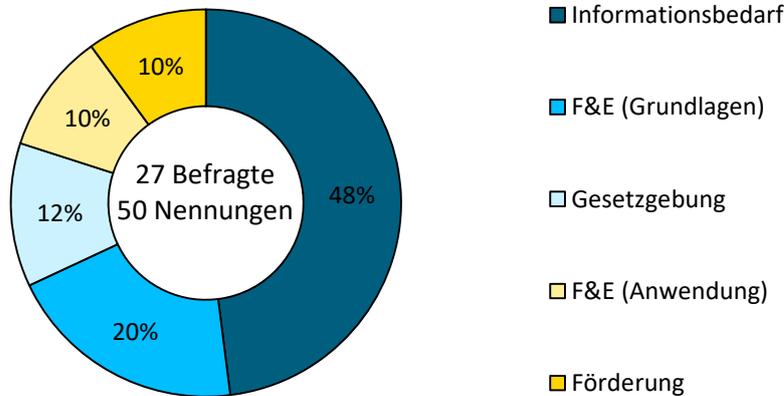


Abbildung C-1: Auswertung des Handlungsbedarfs für die Verbreitung der Wärmepumpentechnik in der Schweizer Industrie

Informationsbedarf: Die Befragten geben an, dass Informationen für potenzielle Anwender der Wärmepumpentechnik nicht in ausreichendem Umfang vorhanden sind. Es werden vor allem dokumentierte Best-Practice Anwendungen und Pinch-Analysen. Zudem werden Trainingsunterlagen und Weiterbildungen für Energieberater und Anlagenplaner gefordert.

F&E (Grundlagen): Gefordert werden vor allem Analysen, die zu einem besseren Marktverständnis führen. Dieses ist zu einen eine Metastudie zu durchgeführten Pinch-Analysen, um die Energieeffizienzpotenziale in verschiedenen Industriezweigen zu charakterisieren. Des Weiteren werden Potenzialabschätzungen für die Anwendung der Wärmepumpentechnik im industriellen Sektor der Schweiz benötigt. Auch die Entwicklung eines Abwärmekatasters wird als sinnvoll eingestuft. Vereinzelt wird Unterstützung bei der Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik (Mehrstufige Anlagen, Höhere Temperaturen) gewünscht.

Gesetzgebung: In diesem Punkt wird der Wunsch geäußert, Industriebetriebe zur Evaluation ihres Energieverbrauchs zu verpflichten. Des Weiteren wird die Idee aufgeworfen, der Abwärme einen Wert zu geben und damit indirekt einen Anreiz zu deren Nutzung zu setzen.

Forschung (Anwendung): In der anwendungsbezogenen Forschung wird die Demonstration von Hochtemperaturwärmepumpen in der Industrie gefordert. Diese Demonstrationsanlagen sollen dazu beitragen, das Vertrauen in die Technik zu steigern.

Förderung: Unter den Ideen zur Förderung der Wärmepumpentechnik kann zwischen direkten und indirekten Förderungen unterschieden werden. Zum einen wird die finanzielle Förderung von Pinch Analysen für Großverbraucher gewünscht. Durch ein besseres Verständnis der Wärmeverwendung wird indirekt die Umsetzung von Wärmerückgewinnungs- und Wärmepumpenanlagen gefördert. Zum anderen wird eine direkte Förderung der Wärmepumpentechnologie gewünscht. Hier wird vor allem auf die Problematik der großen Anfangsinvestition hervorgehoben.

| Ergebnisse der Befragung der Workshop Teilnehmer | |
|---|---|
| Befragte | Hinweis |
| 1 | Industrie Wärmebedarf nach Temperaturniveau besser zu erkennen Fördergeld für mehr Pinch-Analysen von Grossenergie-Konsumenten |
| 2 | Die Industrie muss dazu verpflichtet werden die Prozesse zu analysieren und bei einem grossen Potential für Wärmepumpen diese Massnahme in einem gewissen Zeitraum umzusetzen |
| 3 | Informationsveranstaltung über Industriewärmepumpen koppeln mit Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz Förderung von Hochtemperatur Wärmepumpen durch Pilotprojekten u. Demo-Anlagen im Labor (Vorzeigeprojekte) Im Rahmen SCCER-EIP Hochtemperatur-WP fördern |
| 4 | Aufklärung an potenzielle Investoren Marktpotential abklären Regularien ein wenig mehr in Richtung WP lenken Guten Beispiele von Beat Wellig publizieren Planer ebenfalls miteinbeziehen |
| 5 | Pinch-Analyse (Auswertung) Input Hr. Wellig Ausbildung Pinch + Nutzung WP WP Beispiele in Industrie (Referenzieren) |
| 6 | Statistische Auswertungen Förderung Abwasser-Systeme (Gemeinde/Städte) |
| 7 | Statistik über Wärmepumpen-Integration in Prozessen Regulierungen Forschung: mehrstufige Wärmepumpen "höhere COPs |
| 8 | Transparente Darstellung der Produktionsprozesse in LM Betrieben "BFE? Auswertung der Pinch Analysen wäre wertvoll HS Luzern Experten Talk Kälte - Wärme organisieren (nicht nur Enaw) mit Betreibern |
| 9 | Pinch Analyse Zusammenfassung der Ergebnisse |
| 10 | Erhöhung des Bekanntheitsgrads für industrielle Wärmepumpen-Lösungen Entschärfung der Problematik "Investitionsgrösse" |
| 11 | direkter Kontakt Hersteller WP - Industrie Risikobereitschaft |
| 12 | Mehr Informationen über konkrete Anwendungen in der Industrie (Schweiz) und "best practice" Beispiele |
| 13 | Erleichterter Zugang zu Anwendungshilfen in der Industrie: Wo sind WP im Einsatz? Wo könnten WP eingesetzt werden? Welche Hindernisse bestehen für die weitere Verbreitung? "Anfrage an BFE / GAW etc. |
| 14 | Unterstützung Entwicklung Hochtemperaturanwendung und Lösungen |
| 15 | Hochtemp. Wärmepumpen Technologie fördern |
| 16 | Wunsch: Abwärme hat heute keinen "Wert". Das ist falsch. Wenn dies nicht so wäre, hätten mehr WP-Lösungen eine (wirtschaftlich) Chance. |

| Ergebnisse der Befragung der Workshop Teilnehmer | |
|---|---|
| Befragte | Hinweis |
| 17 | Industrieunternehmen sollten über den Einsatz von HAT-Wärmepumpen (evtl. natürliche Kältemittel) anhand typischer Anwendungen informiert werden (Broschüre, Webseite) Invest, ROI, Voraussetzungen, Rahmenbedingungen, Technologie, Lebensmittel, Landwirtschaft (Fleisch), Maschinenbau, Pharma/Chemie |
| 18 | Mehr Pinch-Analysen + höhere Beraterkompetenz " mehr WP-Anwendungen |
| 19 | Weiterbildung, Planer, enaw&act Moderatoren/Berater Informationen zu Preisen der Installationen (von existierenden Projekten) |
| 20 | Von den Referenten wurde auf die Planungsunsicherheit seitens der Planer hingewiesen " die Hersteller spezifischer Anlagen werden zu spät eingebunden Die Behördenseite hat bei den unteren Ebenen fehlende Fachleute-Erfahrung wie kann dies auf Grund des Druckes von der Politik schneller behoben werden als neue Verordnungen in Kraft treten? Politischer Druck führt im Fluss wie sich heute die Technik bewegt zu Unsicherheiten bei Verantwortlichen |
| 21 | Industrielle Nutzung von Abwärme: grosses Problem in Industrie ist das in der Industrie selber keiner für Abwärme verantwortlich ist. Es sind in der Regel techn. Leiter, die zu 120% mit ihren Strukturanlagen ausgelastet sind. D.h. Abwärme bedeutet Mehraufwand und wenn man eh schon keine Zeit hat bleibt es auf der Strecke, Schade!! |
| 22 | Aktives Beraten von Grossverbrauchern mit "Quick Pinch" ähnlich der sehr schönen Auswertung der Möglichkeiten zur Solarnutzung nur anhand der Adresse |
| 23 | Es fehlen: Statistiken, Pinch-Analysen vorfinanzieren, Energierichtpläne obligatorisch machen, Abwärme-Kataster in jedem Kanton machen (super Beispiel in VS), Wärme-bedarf-Kataster machen (Industrie) |
| 24 | Ausbildung von Planern & Monteuren, Standard für Dokumentation auf die alle Parteien zugreifen können (Installateur/Planer/Monteure/Eigentümer) BFE Standard fordern |
| 25 | Potential für HT-WP (Erzeugung von Dampf) abklären Pilot für HT-Anwendung (>135°C) als Demo-Projekt |
| 26 | Wie weit sind wir technologisch entfernt, um wirtschaftlich, Dampfkessel der Industrie (20-100 MW) zu ersetzen (De-Carbonisierung!) Wo ist die HT-WP in die man vertrauen kann und marktreif ist! Wie aufwendig ist der Antrag für einen Piloten? |
| 27 | Welche Komponenten schränken den Einsatz von WP's in der Industrie ein? Wie schränken die Komponenten einen Einsatz ein? Was kann den Einsatz von WP's fördern? |