

Stefan Wolf, Wissenschaftlicher Mitarbeiter (IER Universität Stuttgart)
Roman Flatau, Wissenschaftlicher Mitarbeiter (IER Universität Stuttgart)
Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen, Lehrstuhl Energieeffizienz (IER Universität Stuttgart)

Rahmenbedingungen für die Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie

Die Wärmepumpentechnologie ist in der Industrie der Schweiz bisher wenig verbreitet. Daher befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Analyse und Bewertung des Stands der Wärmepumpentechnik und der Identifikation von Erfolgsfaktoren für die Anwendung von Wärmepumpen in der Schweizer Industrie. Hierzu wurde eine Befragung von 42 Experten aus den Bereichen Wärmepumpentechnik, Industrie, Planung und Energieberatung, Energiewirtschaft und Wissenschaft durchgeführt. Als Ergebnis der Analyse der Befragung ist festzustellen, dass die befragten Experten die Zukunft der Wärmepumpentechnik in der Schweiz überwiegend positiv beurteilen. Die Entwicklungsschwerpunkte werden in der Erweiterung des Temperaturbereichs und der Reduktion der Investitionskosten verortet. Als Hemmnisse wurden vornehmlich wirtschaftliche Faktoren genannt. Im Ergebnis legt diese Arbeit eine quantitative Grundlage für die Definition von Markt-, Politik- und Forschungsstrategien.

So far heat pump technology is rarely applied in the Swiss industry. Therefore this paper evaluates the state of the art of heat pump technology and identifies success factors for the application of heat pumps in the Swiss industry. For this purpose a survey has been conducted amongst 42 experts in the fields of heat pump technology, industry, planning and consulting, energy sector and science. The analysis of the survey results show that these experts see a rather positive future for heat pump technology in Switzerland. Research and development focus areas are the increase of the temperature range and a decrease in heat pump investment costs. Economic factors are seen as major obstacles for a more widespread application of heat pump technology in the industrial sector. In summary this paper provides a quantitative foundation for the definition of market, policy and research strategies.

Motivation

Die im Rahmen der industriellen Produktion eingesetzte Energie wird zu überwiegenden Teilen letztlich in Wärme gewandelt. Ist das Temperaturniveau dieser Wärme zu gering, als dass man sie weiterhin direkt nutzen könnte, so wird sie als Abwärme an die Umgebung (z. B. durch Kühltürme, Freikühler oder Abwasserströme) abgegeben. Mit der Wärmepumpentechnik besteht die Möglichkeit, diese Wärme auf ein nutzbares Temperaturniveau anzuheben und sie so erneut zu nutzen. Aufgrund der großen Diversität der technischen Rahmenbedingungen stellt die Anwendung der Wärmepumpentechnik in der Industrie eine große Herausforderung dar [1]. Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Abbildung des Stands der Wärmepumpentechnik und die Untersuchung der notwendigen Erfolgsfaktoren für eine weitere Verbreitung dieser Technologie in der Industrie der Schweiz.

Stand der Großwärmepumpentechnik

Die Versorgung industrieller Betriebe mit Wärme und Kälte unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von der Gebäudetechnik. Zum einen werden Anlagen mit großer Heizleistung benötigt, zum anderen muss die erzeugte Wärme bei höheren Temperaturen (meist $> 80\text{ °C}$) bereitgestellt werden. Auch die verfügbaren Wärmequellen (z. B. Abwasser, Maschinenkühlung, Prozessbäder) haben ein höheres Temperaturniveau.

Für industrielle Anwendungen sind vornehmlich Wärmepumpen mit geschlossenen Kreisläufen geeignet. Wärmepumpen mit offenen Kreisläufen, auch Brüdenverdichter genannt, können zur Dampfückgewinnung eingesetzt werden. Dabei handelt es sich allerdings um eine Nischenanwendung, da in diesen Fällen häufig auch eine direkte Wärmerückgewinnung mittels Wärmeübertrager möglich ist.

Wärmepumpen mit geschlossenen Kreisläufen sind flexibel einsetzbar und können heute Versorgungstemperaturen von bis zu 110 °C erreichen. Darüber hinaus befinden sich neue Wärmepumpentechnologien im Prototypen- bzw. Demonstrationsstadium. Mit neuen Kältemitteln, neuen Kreisprozessen und neuen Verdichtertypen werden Versorgungstemperaturen von bis zu 160 °C erreicht. Zudem sind Wärmepumpen über ein breites Leistungsspektrum von wenigen kW_{th} bis zu mehreren MW_{th} verfügbar. Noch größere thermische Leistungen können durch Parallelschaltung mehrerer Wärmepumpenaggregate erzeugt werden. Damit erfüllt die verfügbare Wärmepumpentechnik die Anforderungen industrieller Anwendungen. Eine aggregierte Übersicht über die verfügbare Wärmepumpentechnik bietet Bild 1. Hier sind verschiedene Wärmepumpentypen über ihr jeweiliges Leistungsspektrum und die erreichbare Versorgungstemperatur aufgetragen.

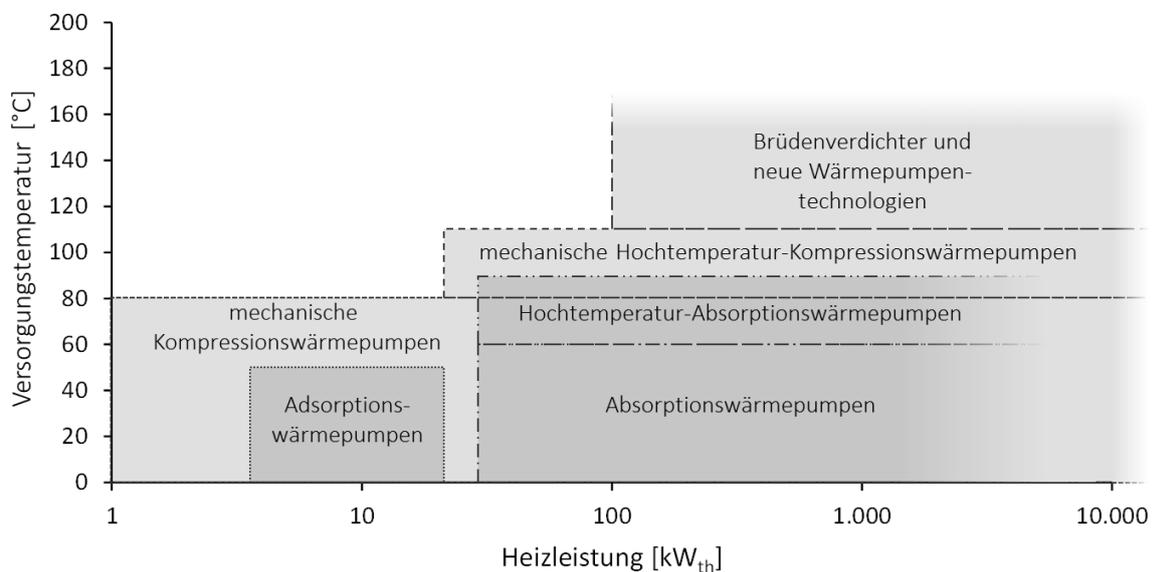


Bild 1: Anwendungsbereiche der Wärmepumpentechnik nach Wärmepumpentyp [2]

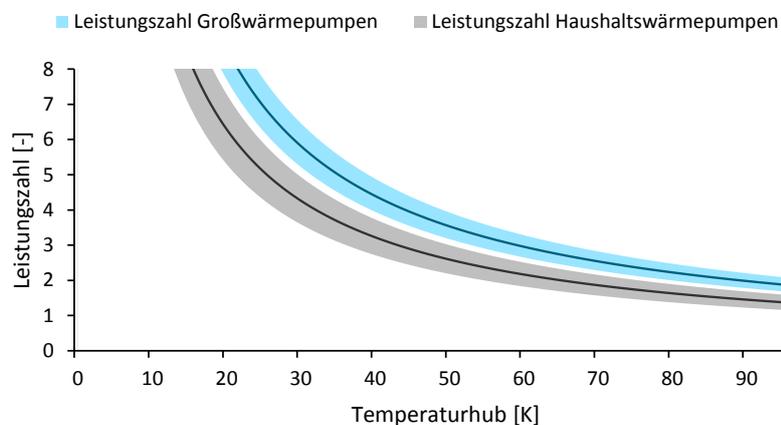
Aufgrund ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten sowie des breiten Leistungs- bzw. Temperaturspektrums sind mechanisch angetriebene Kompressionswärmepumpen und thermisch angetriebene Absorptionswärmepumpen für eine große Vielfalt industrieller Anwendungen geeignet. Eine Übersicht über die Eigenschaften dieser Wärmepumpentypen ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Übersicht über die Eigenschaften von mechanisch und thermisch angetriebenen Wärmepumpen mit geschlossenen Kreisläufen [2]

Kategorie	mechanische	thermische
	Kompressionswärmepumpe	Absorptionswärmepumpe
Antrieb	Elektro-/Verbrennungs- motor	Abwärme, Gas-/Ölbrenner
Nennheizleistung	2 kW _{th} bis 20 MW _{th}	25 kW _{th} bis 20 MW _{th}
max. Temperatur	110 °C (160 °C)	90 °C
max. Temperaturhub pro Stufe	50 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} (480 bis 750 CHF/kW _{th})	500 bis 800 EUR/kW _{th} (530 bis 850 CHF/kW _{th})
Investition inkl. Installation (10 MW _{th})	250 bis 400 EUR/kW _{th} (265 bis 425 CHF/kW _{th})	300 bis 450 EUR/kW _{th} (320 bis 480 CHF/kW _{th})

Mechanische 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 MW_{th}. Der maximale Temperaturhub pro Wärmepumpenstufe beträgt 50 K. Aufgrund der besonderen Eigenschaften des überkritischen Prozesses können Wärmepumpen mit dem Kältemittel R744 (CO₂) auch höhere Temperaturhübe realisieren. Aufgrund der starken Überhitzung in den überkritischen Bereich erfolgt die Wärmeabgabe bei diesen Wärmepumpen mit einem großen Temperaturgradienten im Wärmeübertrager. Daher eignen sich diese Wärmepumpenprozesse, ebenso wie Kaltgasprozesse, vornehmlich für die Erwärmung von Medienströmen mit großem Temperaturhub.

Die Leistungszahl der mechanischen Kompressionswärmepumpe ist stark abhängig von dem zu überwindenden Temperaturhub. In Bild 2 ist die erreichbare Leistungszahl mechanischer Kompressionswärmepumpen als Funktion des Temperaturhubs angegeben. Die Darstellung differenziert zwischen Haushaltswärmepumpen im Leistungsbereich 5 bis 20 kW_{th} und Großwärmepumpen mit mehreren MW_{th} Heizleistung. Zudem ist in einem helleren Farbton ein Konfidenzintervall angegeben. Die spezifischen Investitionskosten für elektrische Kompressionswärmepumpen liegen inklusive der Installationskosten bei 250 bis 700 EUR/kW_{th} (265-750 CHF/kW_{th}).

**Bild 2: Erreichbare Leistungszahlen für mechanische Kompressionswärmepumpen in Abhängigkeit des Temperaturhubs [2]**

Absorptionswärmepumpen werden von wenigen Herstellern und mit vorwiegend großen Wärmeerzeugungsleistungen im MW_{th} -Bereich angeboten. Die Leistungszahlen sind deutlich niedriger als bei Kompressionswärmepumpen. Wird die Absorptionswärmepumpe durch Abwärme angetrieben, kann dieser Effizienznachteil vernachlässigt werden. Die spezifischen Investitionskosten der Absorptionswärmepumpe liegen etwas über denen der mechanischen Kompressionswärmepumpe (siehe Tabelle 1).

Perspektivisch ist für die Wärmepumpentechnik eine weitere Steigerung der erreichbaren Temperaturen auf 130 °C bis 160 °C bis zum Jahr 2020 zu erwarten. Darüber hinaus sind Kombinationen aus Kaltdampfprozess und Brüdenverdichter denkbar, die Dampf mit bis zu 200 °C erzeugen können. 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 Versorgungstemperatur 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.

Rahmenbedingungen für Industriewärmepumpen in der Schweiz

Für die Erfassung der Rahmenbedingungen für die Anwendung von Wärmepumpen in der Industrie der Schweiz wurde eine Expertenbefragung durchgeführt. Insgesamt wurden 42 Experten aus den Bereichen Industrie, Wärmepumpenhersteller, Planung und Energieberatung, Energiewirtschaft und Wissenschaft telefonisch und per E-Mail für die Untersuchung angesprochen. Die erreichte Rücklaufquote beträgt 67 %. Von diesen Antworten stammen 89 % aus der Schweiz. Die übrigen 11 % sind deutschen Unternehmen zuzuordnen, die auf dem Schweizer Markt aktiv sind. Damit geben die Ergebnisse der Umfrage zwar kein repräsentatives Meinungsbild der Schweiz wieder. Vielmehr kondensiert die Umfrage das Wissen ausgewiesener Experten zu Kernaussagen zu den Rahmenbedingungen für Industriewärmepumpen in der Schweiz. Konkret wurde ein Stimmungsbild zur aktuellen Marktsituation in der Schweiz und zur zukünftigen Marktentwicklung abgefragt. Zudem wurden Anwendungsmöglichkeiten für Wärmepumpen in der Industrie, Hemmnisse für die Wärmepumpenanwendung sowie der bestehende Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus Sicht der Forschungseinrichtungen, sowie auf Herstellerseite analysiert. Durchgeführt wurde die Umfrage im November und Dezember 2016.

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 „große“ bis „sehr große“ Bedeutung der Wärmepumpentechnik in Industrieprozessen (siehe Bild 3).

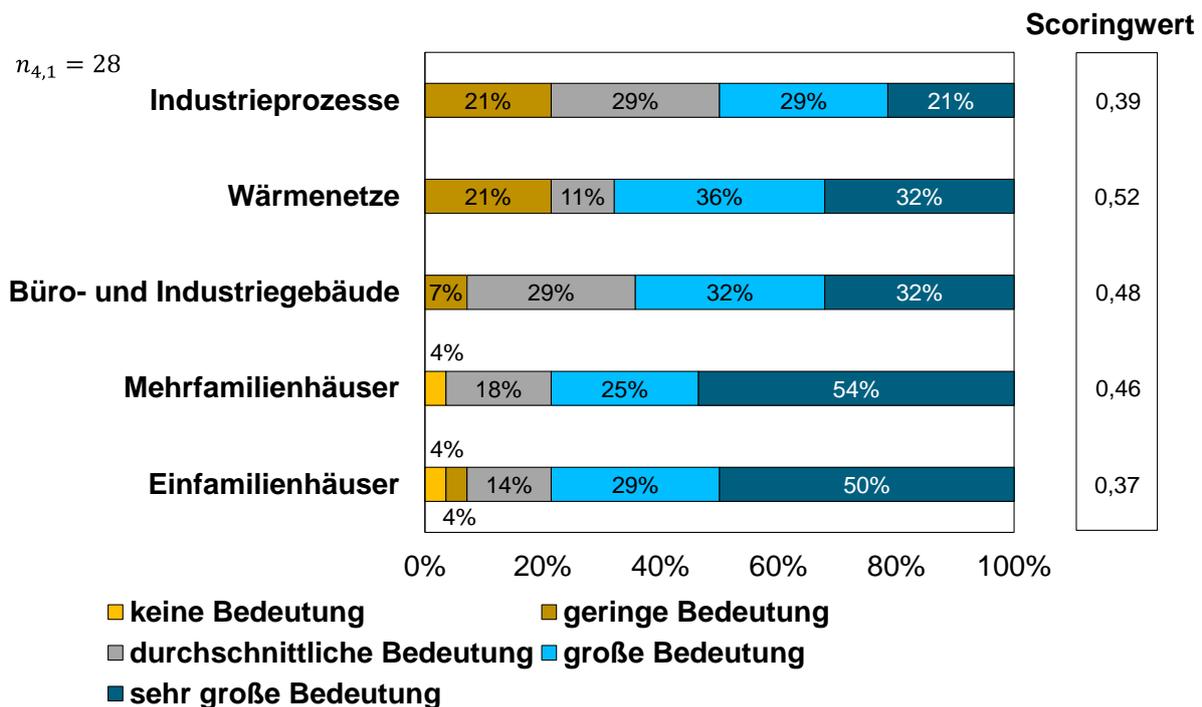


Bild 3: Bedeutung einzelner Marktsegmente für die Anwendung der Wärmepumpentechnik

Der Entwicklungstrend über die kommenden fünf Jahre wurde ebenfalls in fünf Kategorien von „stark abnehmende Bedeutung“ bis „stark zunehmende Bedeutung“ abgefragt. Durch die Quantifizierung dieser Kategorien auf einer Skala von -1 (stark abnehmende Bedeutung) bis +1 (stark zunehmende Bedeutung) mit einer Schrittweite von 0.5 und der Anwendung von Gleichung 1 erhält man für jede Kategorie einen Scoringwert (S_n), der die Entwicklungsperspektive im jeweiligen Marktsegment angibt. In Gleichung 1 gibt n die Bewertungsgröße (in diesem Fall das Marktsegment), k die Bedeutungskategorie, $P_{n,k}$ den prozentualen Anteil der Bedeutungskategorie und W_k den Bewertungsfaktor (-1 bis +1) an. Das Ergebnis ist ein Scoringwert, der die erwartete Marktentwicklung auf einer Skala von -1 bis +1 abbildet. Dieser Scoringwert ist ebenfalls in Bild 3 aufgeführt. Je höher der Scoringwert umso günstiger werden die Bedingungen im jeweiligen Marktsegment eingeschätzt.

$$S_n = \sum_{k=1}^5 P_{n,k} \cdot W_k \quad (1)$$

Mit: S_n Scoringwert
 n Bewertungsgröße
 k Bedeutungskategorie
 $P_{n,k}$ Prozentualer Anteil der Bedeutungskategorie
 W_k Bewertungsfaktor mit $W_k \in \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$

Die Scoringwerte zeigen auf, dass die Befragten für alle Marktsegmente eine positive Entwicklungstendenz sehen. Die größten Zuwächse werden im Segment Wärmenetze gesehen. Die Industrie ist in der Entwicklungsdynamik zwischen den Segmenten Mehr- und Einfamilienhäuser einzuordnen.

Im Weiteren wurde eine qualitative Einschätzung des Anwendungspotenzial für Wärmepumpen in der Schweizer Industrie abgefragt. Hierzu wurden die Befragten gebeten, das vermutete Potenzial auf einer fünfschrittigen Skala von „sehr geringe Bedeutung“ bis „sehr große Bedeutung“ abzuschätzen. Aus dieser qualitativen Einordnung wird mit der in Gleichung (1) beschriebenen Methodik ein Scoringwert für das Wärmepumpenpotenzial im jeweiligen Industriezweig berechnet. In Bild 4 ist der Scoringwert und die daraus resultierende Potenzialrangfolge über den Endenergieverbrauch der Schweizer Industrie aufgetragen. Die Daten zum Endenergieverbrauch der Industrie entstammen der statistischen Auswertung des Jahres 2015 [3].

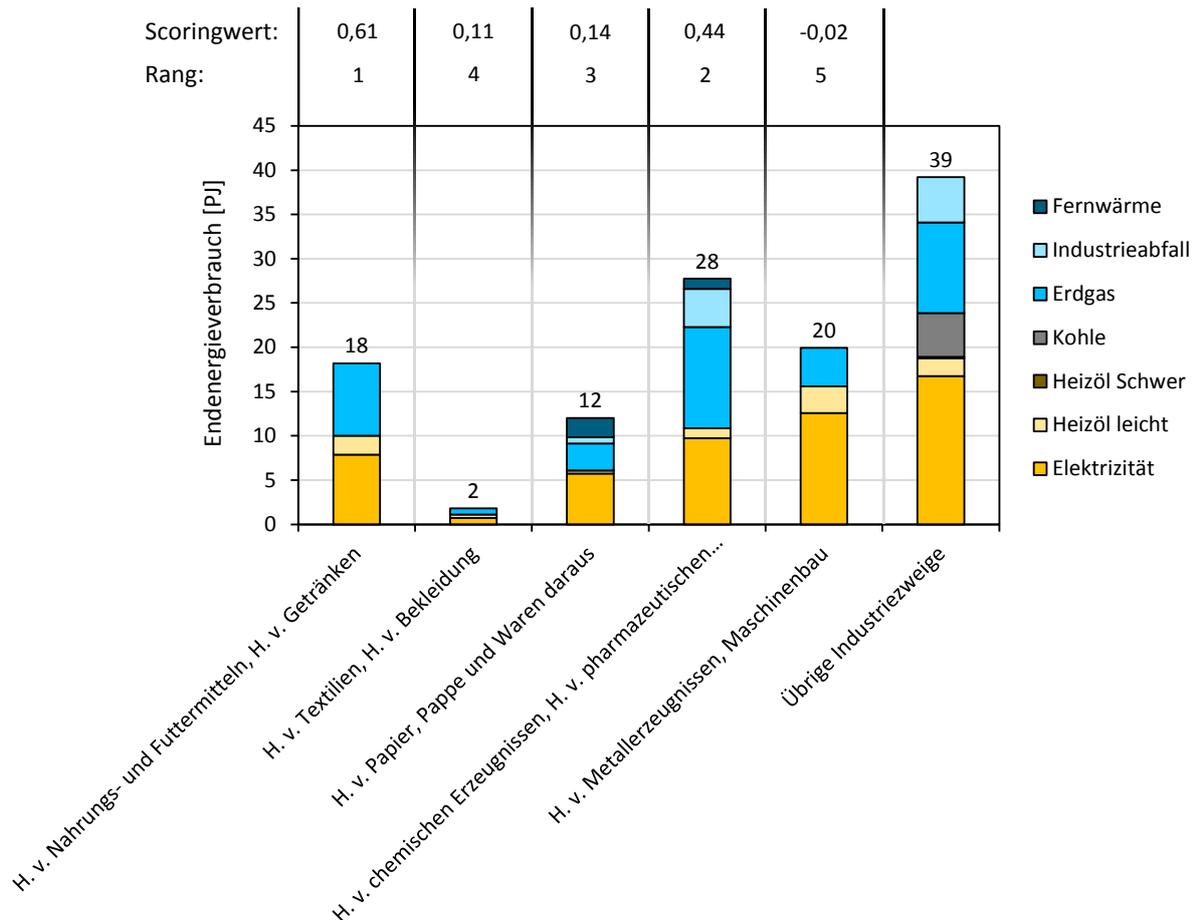


Bild 4: Wärmepumpenpotenzial und Endenergieverbrauch in der Schweizer Industrie

Im Rahmend der Umfrage wurde auch der Forschungsbedarf für die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik erfasst. Dabei wurde eine Differenzierung in wissenschaftlichen Forschungsbedarf und anwendungsorientierten Entwicklungsbedarf vorgenommen. Für beide Kategorien wird der Temperaturbereich der Wärmepumpen als einer der Hauptforschungsschwerpunkte identifiziert (Entwicklung: 58 %, Forschung: 19 %). Seitens des anwendungsorientierten Entwicklungsbedarfs wird darüber hinaus die Reduktion der Kosten für Investition, Unterhalt und Betrieb mit 42 % als der zweitwichtigste Forschungsschwerpunkt identifiziert (siehe Bild 5). Auf der Meta-Ebene lassen sich die genannten Forschungsfelder in fünf Kategorien entsprechend ihres Anteils an den gesamten Nennungen wie folgt ordnen: Prozess (41 %), Kosten (22 %), technologische Weiterentwicklung (16 %), Betrieb (12 %) sowie Kenntnisse und Informationen (9 %).

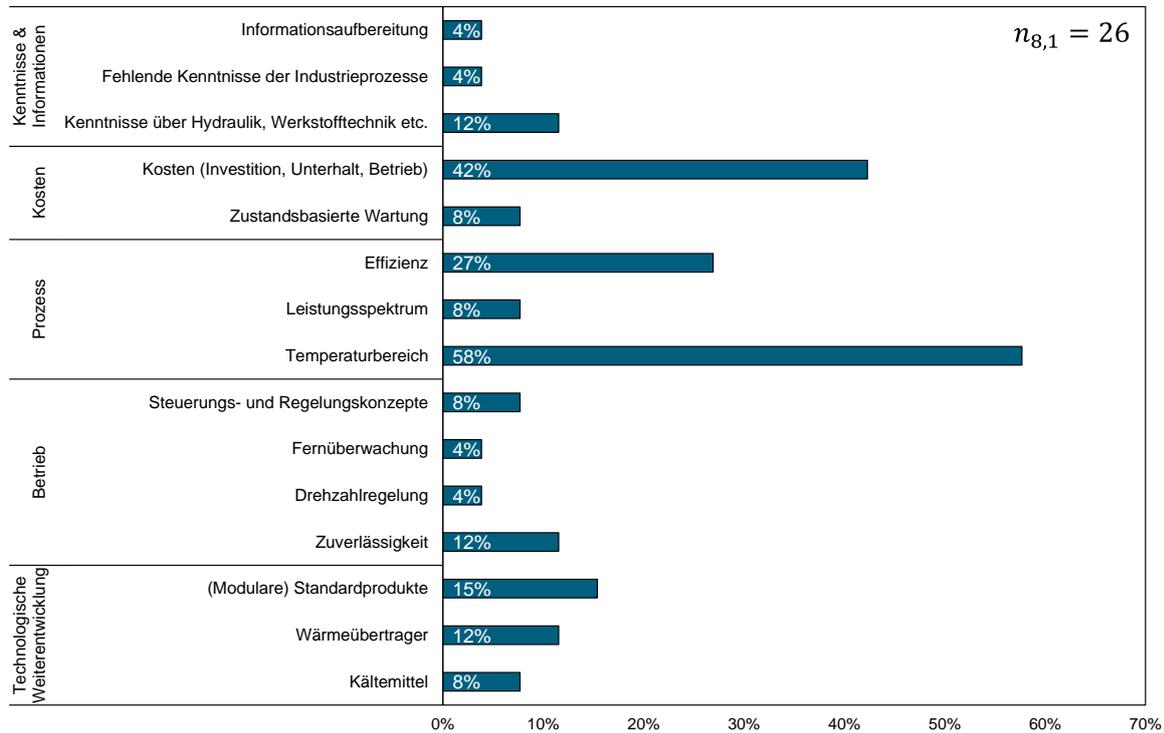


Bild 5: Anwendungsorientierter Entwicklungsbedarf in der Wärmepumpentechnik

Für die wissenschaftliche Forschung stellt mit 46 % die Weiterentwicklung der Kältemittel den zentralen Schwerpunkt dar, weitere 15 % der Befragten sehen die Komponentenoptimierung durch Forschung/Wissenschaft als besonders relevant (siehe Bild 6). Der wissenschaftliche Forschungsbedarf lässt sich in vier Kategorien entsprechend ihrer absteigenden Bedeutung 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 wissenschaftlichen Forschung im Bereich der technologischen Weiterentwicklung sowie der Prozessoptimierung gesehen wird.

Die von den Befragten identifizierten Hemmnisse lassen sich in die Kategorien Technologie und Prozess, Kosten sowie Kenntnisse und Informationen untergliedern. Das größte Hemmnis stellen mit 37 % die aktuellen Energiepreise dar, gefolgt von den hohen Erwartungen an die Amortisationszeit, 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“ (siehe Bild 7). 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.

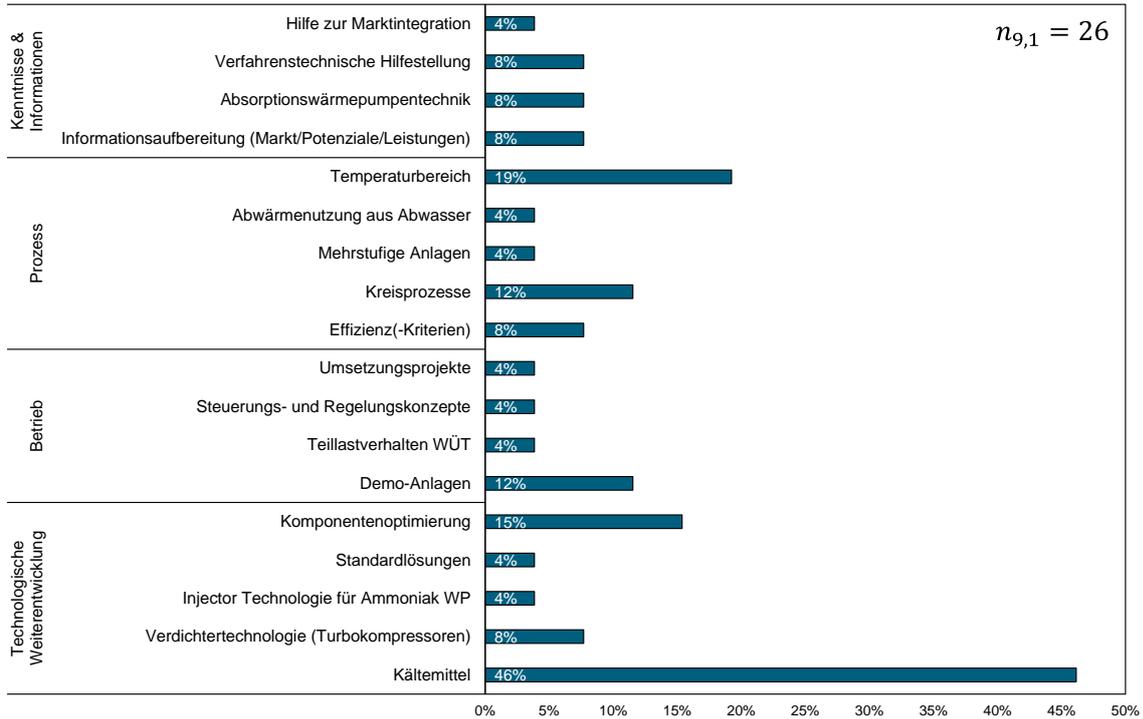


Bild 6: Wissenschaftlicher Forschungsbedarf in der Wärmepumpentechnik

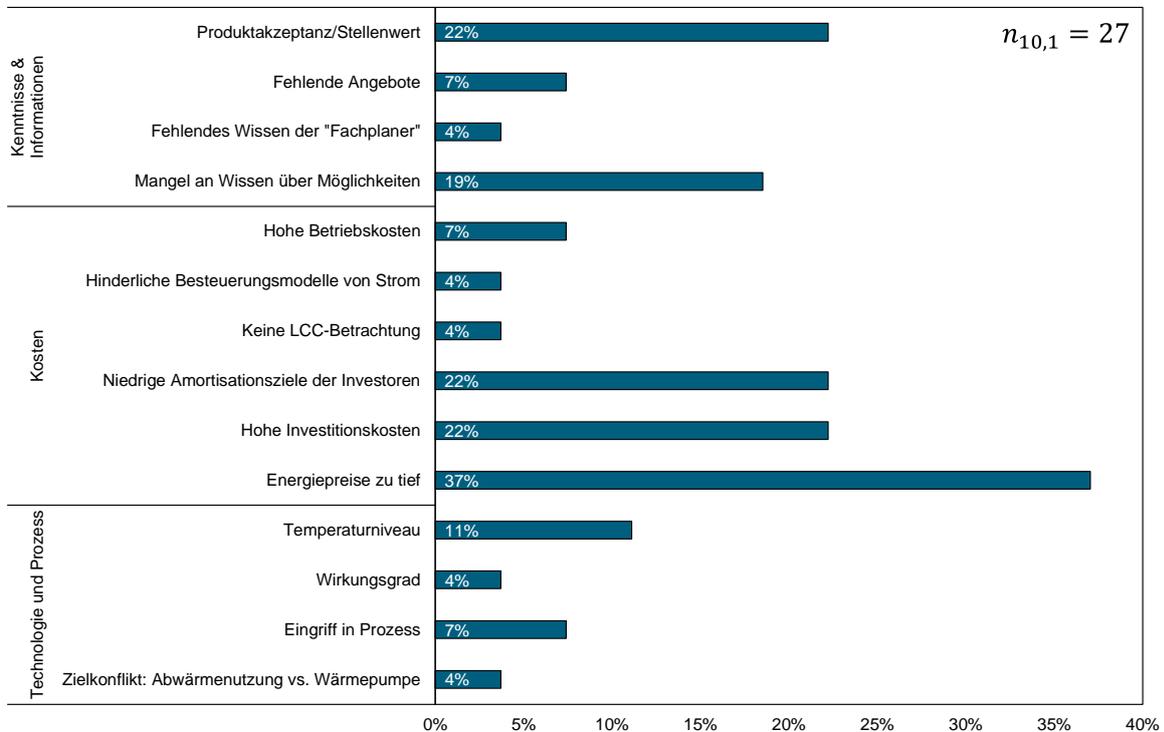


Bild 7: Hemmnisse für die Anwendung der Wärmepumpentechnik in der Schweizer Industrie

Schlussfolgerungen

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, sodass einige Teile des Kältekreislaufes 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 primär für kurzfristig orientierte risikobehaftete Investitionen geeignet. Die interne Verzinsung oder die Total Cost of Ownership (TCO) Betrachtung berücksichtigen die zukünftigen Gewinne und sind 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, zur Planung und zum 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.

Letztlich bleibt festzustellen, dass in den kommenden Jahren mit einer wachsenden Bedeutung der Wärmepumpentechnik in der Schweizer 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.

Die im Rahmen dieses Beitrages vorgestellten Arbeiten wurden durch das Bundesamt für Energie finanziert. Der vollständige Abschlussbericht zum Projekt sowie eine französische Übersetzung dieses Konferenzbeitrages als Zusammenfassung stehen auf der Webseite von Energieschweiz und auf der BFE Homepage unter Umgebungswärme zur Verfügung.

www.energieschweiz.ch

www.bfe.admin.ch/themen/00490/00502/index.html?lang=de&dossier_id=03725

Quellen

- [1] Wolf S., Fahl U., Blesl M., Voß A. u. Jakobs R.: Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland. Forschungsbericht, FKZ 0327514A. Stuttgart. 2014
- [2] Wolf S., Flatau R., Radgen P., Blesl M.: Systematische Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie. Abschlußbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Ittigen. 2017
- [3] Sauvin L., Scherer R., Ferster M., Sterzel J. G. und Muff S.: Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor. Resultate 2015. Bern. 2016