

Überblick des aktuellen Forschungsstandes von alternativen Wärmepumpentechnologien

L. J. ZECHNER, T. SCHOBERER, S. SCHUH, J. WEYR

Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

W. STUTTERECKER

Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: Eine Möglichkeit zur Reduktion von klimarelevanten Kältemitteln ist der Einsatz von alternativen Wärmepumpentechnologien, welche ohne klimaschädliche Kältemittel agieren. In dieser Arbeit werden drei unterschiedliche alternative Wärmepumpentechnologien betrachtet. Hierzu zählen die thermoelektrische, magnetokalorische, und die thermoakustische Wärmepumpe. Es wurden die Forschungsaktivitäten über die letzten 20 Jahre betrachtet und verschiedene Prototypen in Bezug auf Temperaturdifferenz und Coefficient of Performance (COP) verglichen. Dabei zeigte sich, dass die thermoelektrische Wärmepumpe, die meist erforschte Technologie ist und derzeit in Nischenbereichen kommerziell genutzt wird. Die Prototypen der magnetokalorischen Wärmepumpe arbeitet bei annähernd gleichen Temperaturspreizungen wie die thermoelektrische Wärmepumpe. Die thermoakustische Wärmepumpe arbeitet bei höherer Temperaturspreizung. Derzeit sind die alternativen Wärmepumpentechnologien keine Ersatztechnologien zur konventionellen Kompressionswärmepumpe in Bezug auf Energieeffizienz. Daher werden in unmittelbarer Zukunft die alternativen Technologien nicht maßgebend zur Reduktion von klimarelevanten Kältemitteln beitragen.

1. EINLEITUNG

Konventionelle Wärmepumpen und Kältemaschinen werden vorwiegend mit Kältemitteln betrieben, welche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Xu et al. (2013) zeigten in ihrer Studie, dass die Verwendung von Kältemitteln mit einem geringen Global Warming Potential (GWP) einen signifikanten Einfluss auf die globale Erwärmung hat. Es wurde bereits einige Forschungsarbeit zur dieser Problematik geleistet um den negativen Effekt von Kältemitteln zu minimieren. Ciconkov (2018) berichtete über die zwei Hauptmethoden um dies zu bewerkstelligen, einerseits die Reduktion der Kältemittelmenge im System, vorrangig durch neuartige Wärmeübertrager-Konstruktionen, und andererseits durch den Umstieg von den konventionellen Kältemitteln zu natürlichen Kältemitteln wie Ammoniak, Kohlendioxid oder Kohlenwasserstoffe (z.B. Propan). Diese Entwicklungen zeigen durchaus Potenzial, um die Auswirkungen von Wärmepumpen auf das globale Klima zu reduzieren.

Ein komplett anderer Ansatz ist der Einsatz von alternativen aktiven Wärmepumpen- und Kühltechnologien. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf thermoelektrische, magnetokalorische und thermoakustische Wärmepumpen. Diese Wärmepumpentechnologien erlauben den Einsatz ohne konventionelle Kältemittel und sind somit mögliche Alternativen, um den Einsatz von klimarelevanten Kältemitteln zu verringern. Alle drei Technologien verwenden den technischen Begriff Wärmepumpe, da die Energieströme im System gleich mit der konventionellen Kompressionswärmepumpe sind, jedoch entstehen die Energieströme aufgrund von unterschiedlichen physikalischen Effekten. Diese Arbeit soll einerseits die Grundlagen der unterschiedlichen Technologien aufzeigen und andererseits die jeweiligen Vor- und Nachteile sowie das Potential der Technologie darstellen.

2. THERMOELEKTRISCHE WÄRMEPUMPE (TE-WP)

Der erste thermoelektrische Effekt wurde 1821 nach seinem Entdecker T. J. Seebeck benannt. Ihm fiel auf, dass eine elektrische Spannung entsteht, wenn zwei unterschiedliche elektrische Leiter an den Enden verbunden werden und diese Verbindungsstellen unterschiedliche Temperatur aufweisen. Der sogenannte Seebeck-Koeffizient beschreibt die entstehende Spannung aufgrund der Temperaturdifferenz. Erst dreizehn Jahre nach der Entdeckung des Seebeck Effektes erkannte J. Peltier, dass der Seebeck Effekt umkehrbar ist, das bedeutet, es entsteht eine Temperaturdifferenz an den Verbindungsstellen, wenn das System unter Strom gesetzt wird. An einer Verbindungsstelle wird Wärme aufgenommen und bei der anderen Verbindungsstelle Wärme abgegeben. Dieser Effekt ist die Grundlage der thermoelektrischen Wärmepumpe. Die Effizienz von thermoelektrischen Elementen war anfangs sehr gering, sodass nur der Seebeck Effekt für die Messung von Temperaturen und zur Detektion von Wärmestrahlung herangezogen wurden. Erst in den 1950er Jahren mit der Einführung von Halbleitermaterialien als thermoelektrische Materialien wurde die Effizienz erhöht, wobei die Performance im Vergleich zur konventionellen Kompressionswärmepumpe geringer ist. (Goldsmid, 2009)

Der meist verwendete Faktor zur Bestimmung von thermoelektrischen Material ist der sogenannte ZT -Wert. Diese dimensionslose Kennzahl beschreibt wie gut sich ein Material für die thermoelektrische Anwendung eignet und wird wie folgt beschrieben,

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{RK} \quad (1)$$

wobei α der Seebeck-Koeffizient, T die Temperatur, R der elektrische Widerstand und K der Wärmeleitwert ist.

Betrachtet man die ZT -Werte in der Abb. 1, so ist zu erkennen, dass im Bereich von Temperaturen kleiner 100 °C Bismutellurid die höchsten ZT -Werte besitzt und daher auch für Anwendungen bei Raumtemperaturen derzeit das meistverwendete Material ist.

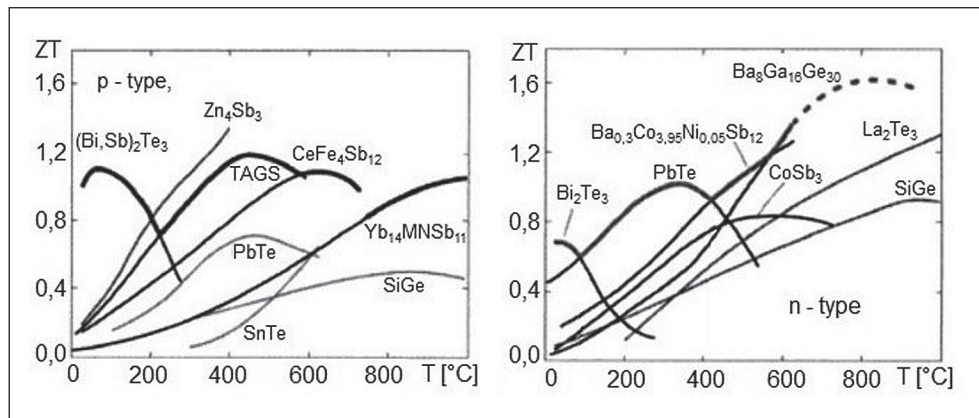


Abb. 1: ZT -Werte in Abhängigkeit der Temperatur von unterschiedlichen Materialien des p-Types (links) und n-Types (rechts) (modifiziert von Prenninger et al., 2009)

In der Literatur gibt es eine Vielzahl an Prototypen und Forschungsprojekten. Eine Auswahl an unterschiedlichen Versuchsträgern ist in der Tab. 1 dargestellt. Die Daten der Tab. 1 wurden aus den jeweiligen Literaturstellen entnommen, wobei die Umrechnung des Coefficient of Performance (COP) zwischen Kühlung und Heizung entsprechend adiabat angenommen wurde und somit mit folgender Gleichung berechnet wurde.

$$COP_{K\u00fchlung} = COP_{Heizung} - 1 \quad (2)$$

Tab. 1: Auszug von Versuchstr\u00e4ger f\u00fcr thermoelektrische W\u00e4rmepumpen

Referenz	Elektrischer Input [W]	Temperatur-differenz [K]	COPHeizung	Übertragungs-medium	Methodik
Min et al. 2006	14,2	9,7	2,2	Luft / Luft	Experimentell
	25,5	12,5	1,8		
	60,5	16,3	1,5		
	86,2	17,1	1,4		
Cosnier et al. 2007	6	6,7	4,3	Fl\u00fcssigkeit / Luft	Experimentell
	24	12,9	2,4		
	61,7	26,9	1,2		
Luo et al. 2005	840	5,2	3,2	Fl\u00fcssigkeit / Fl\u00fcssigkeit	Experimentell
	1860	9,2	2,2		
Zechner et al. 2018	100	10	3,0	Fl\u00fcssigkeit / Fl\u00fcssigkeit	Kombination aus Experimentell und Berechnung
	300	10	2,3		
	500	10	2,0		
	300	20	1,8		
	500	20	1,7		

Kommerziell werden thermoelektrische Module f\u00fcr die K\u00fchlung bei kleinen Leistungen verwendet, wie zum Beispiel K\u00fchlbl\u00f6cken und zur Prozessork\u00fchlung beziehungsweise K\u00fchlung von elektrischen Anlagen. Der Vorteil von der thermoelektrischen W\u00e4rmepumpe ist der Betrieb ohne beweglichen Teile, somit entsteht keine Schallemissionen und nahezu keine Wartung. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Regelung, die eine schnelle Leistungsanpassung, sowie ein einfaches Wechseln zwischen Heiz- und K\u00fchlbetrieb erm\u00f6glicht. Zus\u00e4tzlich besteht die M\u00f6glichkeit den Seebeck Effekt zur Energieerzeugung zu nutzen. Im Vergleich zu den anderen alternativen W\u00e4rmepumpen ist in diesem Bereich weitaus mehr Forschungsarbeit geleistet worden und die Module werden kommerziell genutzt. Daher wirkt sich die Fertigung der Module in h\u00f6heren Mengen positiv auf die Herstellungskosten aus.

3. MAGNETOKALORISCHE W\u00c4RMEPUMPE (MK-WP)

Der magnetokalorische Effekt beschreibt die \u00c4nderung der Temperatur eines Festk\u00f6rpers in Abh\u00e4ngigkeit des angelegten Magnetfeldes. 1843 beobachtete J. Joule, dass eine Eisenprobe durch Anlegen eines Magnetfeldes seine Temperatur \u00e4ndert. Etwa 80 Jahre sp\u00e4ter diskutierten P. Debye und W. Giauque unabh\u00e4ngig voneinander \u00fcber die Anwendung des magnetokalorischen Effekts in der Tieftemperaturphysik, um Temperaturen

nahe dem absoluten Nullpunkt zu erreichen. Die experimentelle Durchführung folgte im Jahr 1933. Vier Jahrzehnte später konstruierte und testete G. Brown den ersten Kühltank basierend auf dem magnetokalorischen Effekt. Durch die Entdeckung des gigantischen magnetokalorischen Effekts im Jahr 1997 gab es einen starken Anstieg der Forschung auf dem Gebiet der magnetokalorischen Kühlung, aber auch Konzepte für magnetokalorische Wärmepumpen wurden intensiver untersucht (Kitanovski et al., 2015).

Um die Temperaturänderung eines magnetokalorischen Materials (MCM) mit variierendem Magnetfeld zu verstehen, muss die Entropie des Gesamtsystems betrachtet werden. In einem vereinfachten Bild kann die Gesamtentropie eines Festkörpers in die Entropie der Atomkerne (Gitterentropie), der Elektronen und des Elektronenspins mit den zugehörigen magnetischen Momenten unterteilt werden (Fultz, 2014). Wenn ein Magnetfeld an ein MCM angelegt wird, werden die magnetischen Momente ausgerichtet, was zu einer Abnahme der magnetischen Entropie führt. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik darf die Gesamtentropie des Systems nicht abnehmen. Die Abnahme der magnetischen Entropie wird durch eine Erhöhung der Gitterentropie bzw. der Phononenentropie im Kristallgitter kompensiert. In der Festkörperphysik beschreiben Phononen kollektive Anregungen der Gitterschwingungen. Eine Erhöhung der Phononenentropie führt daher zu einer Zunahme der Atombewegung im Festkörper, welche wiederum einem Temperaturanstieg entspricht. Beim Abschalten des Magnetfeldes reduziert sich die Ordnung der magnetischen Momente, welches zu einem Anstieg der Entropie der magnetischen Momente führt. Diese Entropieänderung wird durch eine Verringerung der Phononenentropie kompensiert, was schlussendlich zu einer Abkühlung des MCMs führt.

Das Ausmaß der Temperaturänderung bei Änderung des angelegten Magnetfeldes, hängt von der Art des MCM, der magnetischen Flussdichte, aber auch von der Temperatur des MCM zum Zeitpunkt der Magnetfeldänderung ab. Ein kritischer Parameter in diesem Zusammenhang ist die Curie-Temperatur des Materials. Sie definiert jene Temperatur, bei deren Überschreitung die ferromagnetische Eigenschaft eines Materials verschwindet und dieses paramagnetisch wird. Bei dieser Temperatur ist der magnetokalorische Effekt am stärksten ausgeprägt.

Das abwechselnde Erwärmen und Abkühlen des MCMs durch die Variation des angelegten Magnetfeldes kann, in einem Kreisprozess angewendet, für den Aufbau einer Wärmepumpe verwendet werden, um Wärme von einem niedrigen auf ein hohes Temperaturniveau zu übertragen. Ein entscheidender Vorteil der magnetokalorischen Wärmepumpe ist dabei die Tatsache, dass diese für den Betrieb keinerlei klimarelevanten Gase benötigt.

Der erste Prototyp eines auf dem magnetokalorischen Prinzip basierenden Kühltanks wurde im Jahr 1976 von Brown entworfen und gebaut. Doch erst zu Beginn des 21. Jahrhunderts war ein deutlicher Anstieg an neu entwickelten Prototypen zu verzeichnen, wie in Abb. 2 dargestellt.

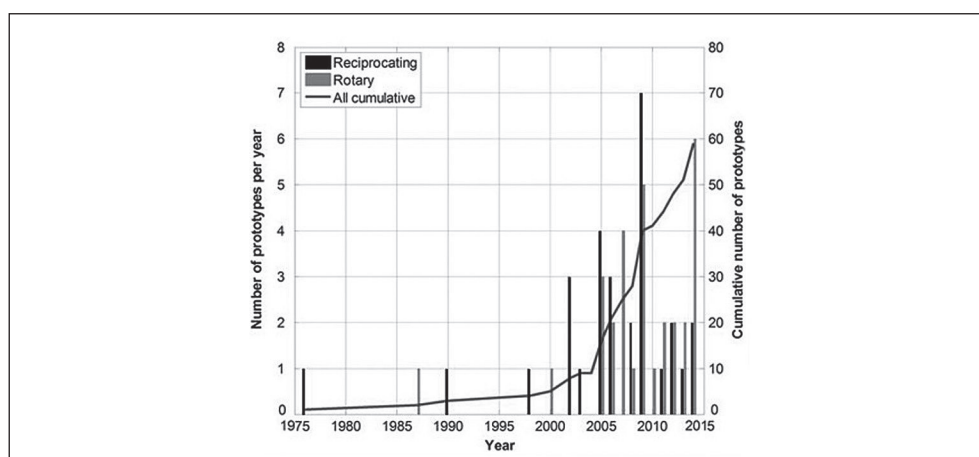


Abb.2: Anzahl an pro Jahr vorgestellten Prototypen seit dem Jahr 1976 (Kitanovski et al., 2015).

Bei der Realisierung der Prototypen kann grundsätzlich zwischen zwei Konstruktionsarten unterschieden werden. In einem Fall wird eine Magnetfeldänderung durch eine relative linearen Hin- und Her-Bewegung zwischen dem MCM und dem Magneten erreicht. Im anderen Fall erfolgt eine Änderung des Magnetfeldes durch Rotation des Magneten bei starrem MCM bzw. Rotation des MCMs bei starrem Magneten. Für den energieeffizienten Betrieb erweist sich der Einsatz von Dauermagneten als zielführend, wodurch die magnetische Flussdichte jedoch auf Werte kleiner zwei Tesla beschränkt ist. Für Grundlagenforschung wurden Prototypen mit supraleitenden Spulen entworfen, welche Flussdichten von bis zu sieben Tesla generierten. Eine Übersicht von Prototypen, welche hinsichtlich industrieller Anwendung interessante Werte liefern, ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Wobei wieder die Umrechnung des Coefficient of Performance (COP) zwischen Kühlung und Heizung entsprechend adiabatisch angenommen wurde und Gleichung (2) berechnet wurde.

Tab. 2: Auszug von Versuchsträger für magnetokalorische Wärmepumpen

Referenz	Elektrischer Input [W]	Temperaturdifferenz [K]	COPHeizung	Type	Methodik
Eriksen et al. 2015	44,5	16	2,35	Rotierend	Experimentell
	32,9	10,2	4,1		
	30,8	7,9	4,9		
	29,9	5,4	5,6		
Jacobs et al. 2014	719	6,6	3,7	Rotierend	Experimentell
	723	8,6	3,67		
	746	10,4	3,34		
	655	14,2	1,98		
Lozano et al. 2013	286	16,8	1,7	Rotierend	Experimentell
	245	14,3	1,82		
	386	13,8	2,04		
	326	12,9	2,23		
	274	10,2	2,46		
	263	4,8	2,52		
	250	3,2	2,6		
	247	1,5	2,62		

Zwar wurden bei Messen bereits Kühltische basierend auf dem magnetokalorischen Effekt vorgestellt. Dabei handelte es sich jedoch stets um Prototypen. Bisher gibt es noch keine kommerzielle Vermarktung derartiger Kühl- oder Heizgeräte. In den Pressemitteilungen diverser Hersteller, die an magnetokalorischen Kühl- bzw. Heizgeräten arbeiten, geht man noch von mehreren Jahren Entwicklungsarbeit aus, bevor Produkte am Markt erhältlich sein werden.

4. THERMOAKUSTISCHE WÄRMEPUMPE (TA-WP)

Bryon Higgins legte bereits 1777 mit der Entdeckung der „Singende Flamme“ die Grundlagen für das heutige Fachgebiet der Thermoakustik. Dabei wurde eine Wasserstoffflamme in ein beidseitig offenes Rohr geführt, wobei bei geeigneter Stellung akustische Schwingungen beobachtet wurden. 1963 beschäftigten sich Gifford und Longworth erstmals mit der Erzeugung von Temperaturgradienten mittels akustischer Schwingungen (Jinshah et al., 2013).

Ein thermoakustisches System wandelt Wärmeenergie in mechanische Energie in Form von Schallwellen um, oder kann umgekehrt mittels akustischer Schallwellen Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau heben (Wärmepumpe). Das thermoakustische System besteht im einfachsten Fall aus einer Röhre, gefüllt mit einem Gas. In dieser Röhre wird ein Wärmetauscher mit möglichst großer Austauschfläche, in Form von gestapelten Metallplatten (Stack) an einem Ende mit einer Wärmequelle und an dem anderen Ende mit einer Wärmesenke verbunden. Wenn der Temperaturgradient einen kritischen Wert übersteigt, kann spontan eine mechanische Druckwelle entstehen, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortbewegt und dabei mechanische Energie transportiert. Eine solche thermoakustische Zelle kann in der Folge mit einem akustischen Resonator verbunden werden, in dem ein starkes akustisches Feld angeregt wird. Der Energieübertrag findet entlang des Wärmetauschers statt, genauer an der thermischen Grenzschicht, die sich entlang der Platten ausbildet. Demnach wird der Plattenabstand durch die Dicke der thermischen Grenzschicht bestimmt, siehe Abb. 3.

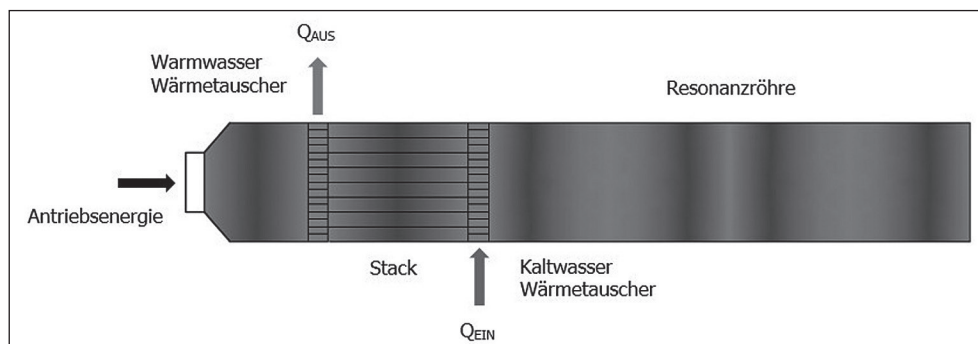


Abb. 3: Schematische Darstellung des thermoakustischen Effekts - Umwandlung mechanische Energie in Schall/Wärme

Die Literaturrecherche ergab, dass es mehrere Projekte zur Untersuchung von thermoakustischen Aggregaten gab. Jedoch wurden nur wenig fundierte Aufzeichnungen über vollständig vermessene Prototypen dokumentiert.

Auf europäischer Ebene ist das EU-Projekt THATEA (Spoelstra et al., 2012) zu nennen, welches im Rahmen der FP7-Förderschiene von 2009 bis 2012 thermoakustische Wärme-Kraft- und Kraft-Wärme-Anwendungen untersuchte. Im Rahmen des Projektes wurden Anwendungen als thermoakustische Wärme-Kraft-Maschine und thermoakustische Wärmepumpe bzw. Kältemaschine untersucht. Als Arbeitsmedium wurde Helium bei 30 bar verwendet. Bei der Verwendung als Wärmepumpe konnte ein Temperaturhub von 10 °C auf 80 °C erreicht werden. Die Daten der vermessenen thermoakustischen Wärmepumpe sind in der Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Auszug von Versuchsträger für thermoakustischen Wärmepumpen

Referenz	Elektrischer Input [W]	Temperatur-differenz [K]	COPHeizung	Type	Methodik
Tijani and Spoelstra 2012	93	70	2,1	Experimentell	
	54	50	2,55		

5. FORSCHUNGSLEISTUNG UND ERGEBNISSE

Um eine Übersicht über die geleistete Forschungsarbeit in den unterschiedlichen Technologien zu erhalten wurde eine historische Auswertung an begutachteten Publikationen durchgeführt. Hierzu wurde die Publikationsdatenbank von Elsevier (2018) herangezogen und nachfolgenden Begriffen „Thermoelectric“, „Magnetocaloric“ und „Thermoacoustic“ im Titel, Abstrakt und Keywords gesucht. Die Ergebnisse dieser Recherche sind in der Abb. 4 dargestellt.

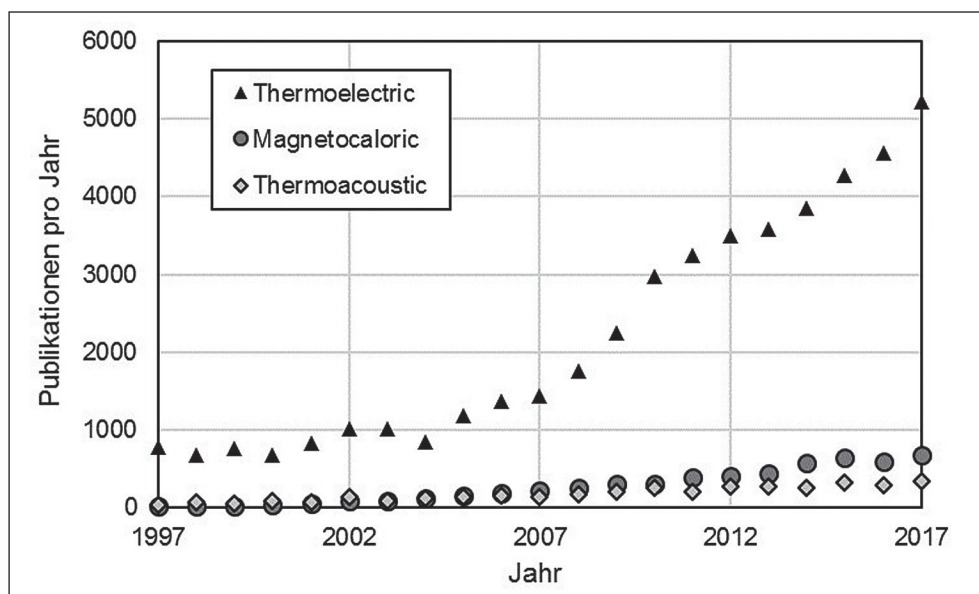


Abb. 4: Publikationen im Zeitraum von 1997 bis 2017 in Bereich der Thermoelektrik, Magnetokalorik und Thermoakustik

In der Abb. 4 ist zu erkennen, dass über die vergangenen zwanzig Jahren die meisten Publikationen im Bereich Thermoelektrik veröffentlicht wurden. Dies begründet auch warum die Thermoelektrik heute schon im kommerziellen Produkten zur Anwendung kommt, da schon über mehrere Jahre in diesem Bereich geforscht wurde und dies den zeitlichen Übergang von Forschung zur Anwendung ermöglicht. Bei einer Technologie, bei der viel Forschung betrieben wurde, ist im Vergleich zu Technologien mit geringerer

Forschungsintensität die Wahrscheinlichkeit geringer markanter Forschungsfortschritte zu erzielen. Demzufolge sind geringere Effizienzsteigerung im Bereich der Thermoelektrik zu erwarten, als bei der Magnetokalorik und der Thermoakustik. Des Weiteren sei zu erwähnen, dass in Abb. 4 ein steigender Trend bei allen drei Technologien zu erkennen ist, dies lässt auf ein erwartetes Forschungspotential in allen Bereichen zurückschließen. Im Bereich der Magnetokalorik wurden mehr Publikationen veröffentlicht als im Bereich der Thermoakustik. Somit ist die Thermoakustik die am wenigsten erforschte Technologie der betrachteten alternativen Wärmepumpen. Dies zeigt sich auch bei der Anzahl an fundiert vermessenen Versuchsträgern. Vergleicht man die Versuchsträger der unterschiedlichen Technologien, so erkennt man in Abb. 5, dass die TE-WP und die MK-WP im gleichen Temperaturbereich (Temperaturdifferenz kleiner 30 Kelvin) agieren. Wobei, wie erwartet der COP bei höheren Temperaturspreizungen abnimmt. Im Vergleich zur TE-WP zeigt die MK-WP geringfügig höhere COPs. Jedoch erreichen die TE-WP höhere Temperaturspreizungen als die MK-WP bei den betrachteten Prototypen. Der Versuchsträger der TA-WP arbeitet bei höheren Temperaturspreizungen. Demnach agiert die TA-WP im Vergleich zu TE-WP und MK-WP in einem anderen Anwendungsbereich.

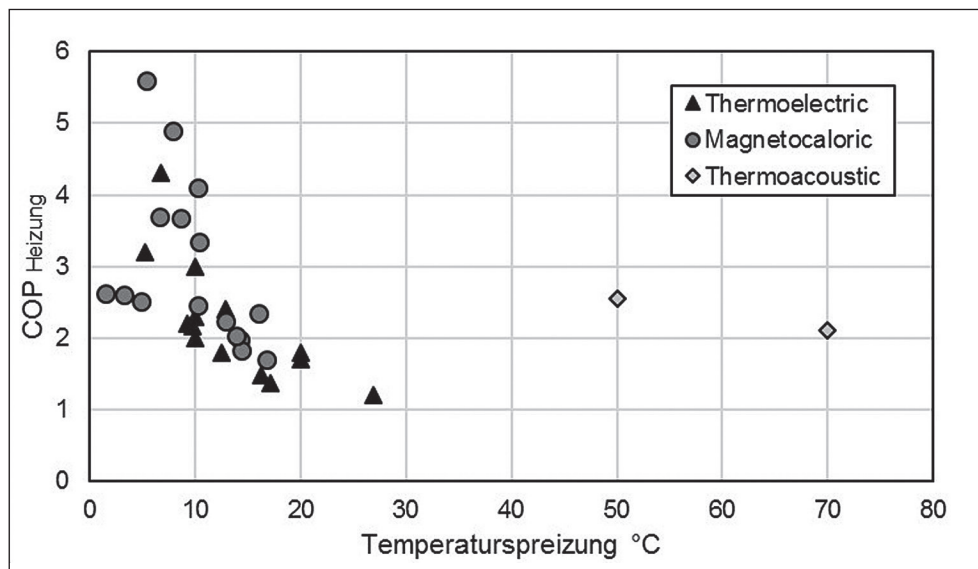


Abb. 5: Vergleich unterschiedlicher alternativer Wärmepumpentechnologien, anhand des Coefficient of Performance (COP) und der Temperaturspreizung

6. DISKUSSION

Bei thermoelektrischen und magnetokalorischen Wärmepumpe ist die zukünftige Entwicklung von der Materialforschung der jeweiligen Kältemittel abhängig. Als Kältemittel kommen vorwiegend festförmige zum Einsatz, welche bei zweckgebundenen Bedingungen nicht gasförmig in die Atmosphäre gelangen. Die Umweltauswirkungen bei Abbau und Herstellung sowie die Verfügbarkeit dieser Materialien wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Die Datengrundlage für thermoakustische Versuchsträger bezieht sich auf eine Literaturstelle und ist daher nicht repräsentativ für die Technologie.

In dieser Arbeit wurden nur drei alternative Wärmepumpentechnologien betrachtet. Weitere Technologien wie zum Beispiel die Thermoelastische Wärmepumpe wurden nicht berücksichtigt.

7. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Arbeit zeigt einerseits die wissenschaftliche Aktivität anhand der Publikation. Bei Thermoelektrik, Magnetokalorik und Thermoakustik ist ein steigender Trend an Veröffentlichungen zu erkennen. Wobei in der Thermoelektrik in den Jahren 1997 bis 2017 mehr als das Achtfache an Publikation im Vergleich zur Magnetokalorik veröffentlicht wurden und mehr als das Zwölfwache im Vergleich zur Thermoakustik. Dies führt dazu, dass thermoelektrische Module schon kommerziell hergestellt und im Nischenbereichen eingesetzt werden. Die MK-WP konkurriert mit der TE-WP in Bezug auf Temperaturspreizung und Energieeffizienz. Wobei derzeit die TE-WP im Vergleich zur MK-WP eine kompaktere Bauweise und einen Betrieb ohne beweglichen Teile aufweist. Der Anwendungsbereich der MK-WP und der TE-WP ist limitiert aufgrund der geringen Temperaturspreizungen (kleiner 30 K). Die Effizienz der MK-WP und der TE-WP ist stark vom verwendeten Kältemittelmateriale abhängig. Daher ist Fortschritt in der Materialforschung ein wesentlicher Faktor für die zukünftige Entwicklung dieser Technologien. Die TA-WP ist vergleichsmäßig weniger von der Materialforschung geprägt und der betrachtete thermoakustische Versuchsträger agiert in einem höheren Temperaturbereich und ist somit auch für einen erweiterten Anwendungsbereich interessant.

Betrachtet man die erreichte Effizienz der Versuchsträger, so erkennt man, dass gegenwärtig die alternativen Wärmepumpen keine Ersatztechnologien zur Kompressionswärmepumpe sind. Daraus wird abgeleitet, dass bei kurzfristiger Betrachtung der Einsatz von alternativen Wärmepumpentechnologien nicht die geeignete Strategie zur unmittelbaren Reduzierung von klimarelevanten Kältemitteln ist. Bei langfristigeren Betrachtungen ist die Entwicklung einer steigenden Energieeffizienz der unterschiedlichen Technologien maßgebend für den zukünftigen Einsatz.

ANERKENNUNG

Diese Arbeit wird mit Mitteln des „Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft“ gefördert und im Rahmen des Förderprogramms „COIN“ durchgeführt.

LITERATUR

- Ciconkov R. (2018): Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions, *International Journal of Refrigeration*, 86, p. 441-448
- Cosnier M., Fraisse G. and Luo L. (2008): An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air heating system, *International Journal of Refrigeration*, 31, p. 1051-1062
- Elsevier B.V. (2018): Evaluation of Scopus® on 05/08/2018
- Eriksen D., Engelbrecht K., Bahl C.R.H., Bjork R., Nielsen K.K., Insinga A.R. and Pryds N. (2015): Design and experimental tests of a rotary active magnetic regenerator Prototype, *International Journal of Refrigeration*, 58, p. 14-21
- Fultz B. (2014): *Phase Transitions in Materials*. 1. publ. ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press
- Goldsmid H. (2009): *Introduction to Thermoelectricity*, Springer Series in Materials Science, Springer Berlin Heidelberg
- Jacobs S., Auringer J., Boeder A., Chell J., Komorowski L., Leonard J., Russek S. and Zimm C. (2014): The performance of a large-scale rotary magnetic refrigerator, *International Journal of Refrigeration*, 37, p. 84-91
- Jinshah B. S., Ajith Krishnan R. and Sandeep V. S. (2013): Study on A Standing Wave Thermoacoustic Refrigerator Made of Readily Available Materials. *International Journal of Scientific and Research-Publications*, 3, Issue 7, p. 2250-3153
- Kitanovski A., Tušek J., Tomc U., Plaznik U., Ožbolt M. and Poredoš A. (2015): *Magnetocaloric Energy Conversion*. Cham: Springer

- Lozano J.A., Engelbrecht K., Bahl C.R.H., Nielsen K.K, Eriksen D., Olsen U.L., Barbosa Jr. J.R., Smith A., Prata A.T. and Pryds N. (2013): Performance analysis of a rotary active magnetic refrigerator, *Applied Energy*, 111, p. 669-680
- Luo Q., Tang G. and Gong G. (2005): Experimental study on thermoelectric heat pumps for energy recovering and local heating in building, *International Journal an Architectural Science*, 6, 4, p. 173-177
- Min G. and Rowe D.M. (2016): Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators, *Applied Energy*, 83, p. 133-152
- Prenninger P., Grytsiv A., Rogl P. and Bauer E. (2009): Thermo-Electric-Materials with Better Efficiencies and Lower Costs: A Contradiction?, in Jaensch D., *Thermoelektrik*, Expert Verlag, p. 124-137
- Spoelstra, S., et al. (2012): THERMOACOUSTIC TECHNOLOGY FOR ENERGY APPLICATIONS. Acronym: THATEA, Final Report, FP7-Project, downloaded at www.thatea.eu on August 18th 2015
- Tijani M.E.H. and Spoelstra S. (2012): High temperature thermoacoustic heat pump, 19th International Congress on Sound and Vibration, Vilnius, Litouwen
- Xu Y., Zaelke D., Velders G.J.M. and Ramanathan V. (2013): The role of HFCs in mitigating 21st century climate change, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, p. 6083-6089
- Zechner L.J., Schoberer T., Schuh S., Weyr J. and Stutterecker W. (2018): Analsis of Thermoelectric Heat Pumps for Applications in Buildings, 4th International Conference On Building Energy, Environment, Melbourne, Australia, ID-96

Kontaktidaten Autor:

Lukas J. Zechner

Email: lukas.zechner@forschung-burgenland.at