

Energieeffiziente Enteisierung bei Pkw-Wärmepumpensystemen

Die Effizienz von außenluftbasierten Wärmepumpensystemen wird durch die Vereisung des Außenraumwärmetauschers und die dadurch notwendige Enteisierung deutlich verringert. Das Virtual Vehicle Research Center arbeitet mit dem Institut für Wärmetechnik der TU Graz an der energetischen Optimierung des Gesamtprozesses mittels Experiment und Simulation.

MOTIVATION

Die Klimaanlage ist einer der relevantesten Nebenverbraucher im Pkw und hat einen beträchtlichen Energiebedarf. Speziell bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen fällt die beim herkömmlichen Verbrennungsmotor erzeugte Abwärme teilweise oder sogar gänzlich weg. Wird dies durch elektrische Zuheizung kompensiert, reduziert sich die Reichweite der Fahrzeuge drastisch. Da die Reichweite aber ein Hauptkriterium für die Kundenakzeptanz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ist, stellt die Erhöhung der Reichweite durch die Nutzung der Klimaanlage für Heizzwecke – zum Beispiel als Luft/Luft-Wärmepumpe – eine interessante Alternative dar.

Im Wärmepumpenbetrieb fungiert der Innenraumwärmetauscher als Gaskühler

beziehungsweise Kondensator und der Außenraumwärmetauscher als Verdampfer, der Wärme aus der Umgebung aufnimmt. Um dies auch bei niedrigen Außentemperaturen zu ermöglichen, liegen die Verdampfungstemperaturen teilweise auch deutlich unter 0 °C . Folglich sinkt auch die Oberflächentemperatur des Wärmetauschers unter den Gefrierpunkt von Wasser, was die Voraussetzung für eine Eisbildung auf der Wärmetauscheroberfläche ist. Die sich bildende Eisschicht verringert durch ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{Eis}} \approx 1\text{ W/(m K)}$) im Vergleich zum Wärmetauscherwerkstoff ($\lambda_{\text{Alu}} \approx 235\text{ W/(m K)}$) den Wärmedurchgang. Zusätzlich vergrößert sich durch die (teilweise) Blockade des Luftpfades der Druckverlust und die zur Wärmeübertragung vorhandene Fläche wird verkleinert [1]. Diese negativen Effekte

verringern mit fortlaufendem Betrieb die Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers und damit des Gesamtsystems. Deshalb ist es notwendig, entweder die Eisbildung durch geeignete Maßnahmen zu verhindern oder eine Enteisung des Wärmetauschers in gewissen Zeitabständen durchzuführen. Während dieser Enteisung muss der Komfort im Innenraum aufrechterhalten werden, zum Beispiel durch zwischenzeitliche elektrische Beheizung.

Zur Optimierung des Gesamtvorgangs (Erkennung der Vereisung – Umschaltung in den Enteisungsbetrieb – Rückkehr zum Wärmepumpenbetrieb nach abgeschlossener Enteisung) wurden auf den Prüfständen des Instituts für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz Messungen am Prototyp einer CO₂-Klimaanlage mit Wärmepumpenfunktion durchgeführt. Zudem wurden mit der Simulationssoftware Dymola und der Modelica-Bibliothek AirConditioning Simulationsmodelle für das Gesamtsystem erstellt, um verschiedene Enteisungsstrategien zu bewerten und die Systemeffizienz zu optimieren.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Bei den experimentellen Untersuchungen, **BILD 1**, wurde zuerst das Systemverhalten des Prototyps einer reversiblen Klimaanlage mit dem Kältemittel R744

(CO₂) bei Eisbildung am Außenraumwärmetauscher detailliert untersucht. Dabei wurde beispielsweise der Einfluss verschiedener Umgebungszustände (Lufttemperatur und Luftfeuchte) auf das Vereisungsverhalten analysiert. Es zeigte sich, dass bei Lufttemperaturen in der Nähe des Gefrierpunkts beziehungsweise leicht darüber, die stärkste Vereisung stattfindet. So fiel beispielsweise die Heizleistung in einem Versuch bei 0 °C und einer relativen Luftfeuchte von 75 % nach 30 min um circa 30 % und die Leistungszahl (Coefficient of Performance, COP), der die Effizienz der Anlage widerspiegelt, von 3,0 auf 2,1 [2]. Die Regelung der Kompressordrehzahl erfolgte dabei auf eine konstante Kältemittelleintrittstemperatur in den Gaskühler. **BILD 2** zeigt den Außenraumwärmetauscher und die sich bildende Eisschicht bei diesem Versuchslauf. Zur messtechnischen Erkennung der Eisbildung wurden verschiedene Größen des Kältekreislaufs während der Vereisung (zum Beispiel Temperaturdifferenz zwischen Luft und Kältemittel am Außenraumwärmetauscher, luftseitiger Druckverlust etc.) aufgezeichnet und deren Eignung für diese Aufgabe bewertet.

Im Anschluss an die Messungen bei Vereisung des Außenraumwärmetauschers wurde auch der Enteisungsvorgang mittels Kreislaufumkehr (Reverse Cycle) experimentell untersucht. Eine vollständige Abtauung des Wärmetau-



BILD 1 Vermessung des Prototyps einer CO₂-Klimaanlage am Systemprüfstand

AUTOREN



Dipl.-Ing. Dr. techn. Alois Steiner ist stellvertretender Gruppenleiter im Bereich Thermal Management & Mobile Air Conditioning am Virtual Vehicle Research Center in Graz (Österreich).



Dipl.-Ing. Benedikt Rabi ist Forscher im Bereich Thermal Management & Mobile Air Conditioning am Virtual Vehicle Research Center in Graz (Österreich).



Dipl.-Ing. (FH) Michael Waltenberger ist Gruppenleiter im Bereich Thermal Management & Mobile Air Conditioning am Virtual Vehicle Research Center in Graz (Österreich).



Ao. Univ.-Prof. Dr. René Rieberer ist stellvertretender Institutsleiter und Gruppenleiter Heizungs-, Kälte- und Klimatechnik am Institut für Wärmetechnik der TU Graz (Österreich).

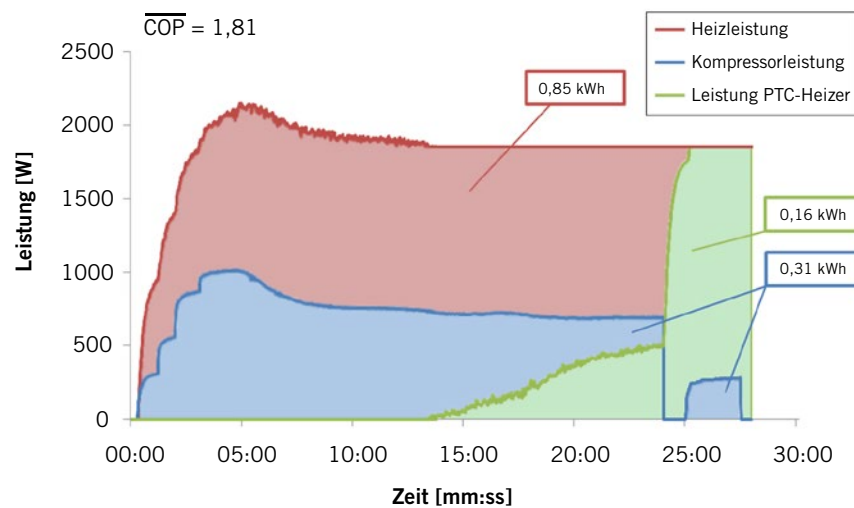
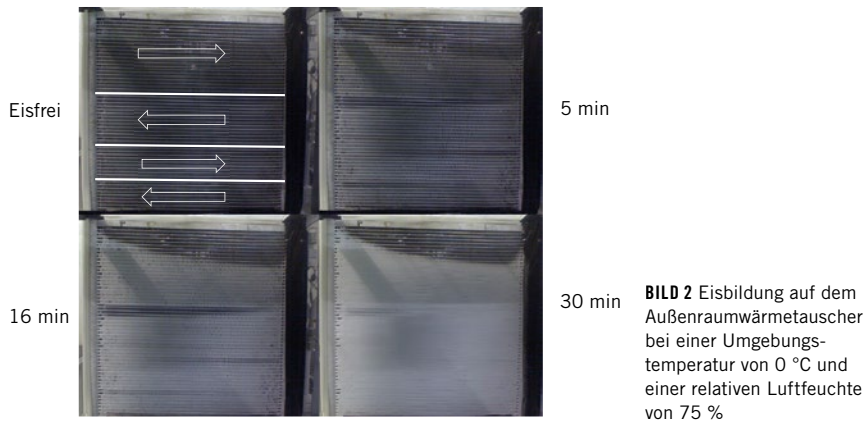


BILD 3 Energetische Betrachtung eines Vereisungs-Enteisungs-Zyklus mit zusätzlicher elektrischer Beheizung der Fahrgastzelle

schers dauerte dabei circa 2 bis 3 min, je nach verwendeter Kompressordrehzahl und Öffnung des Expansionsventils. Letztgenannte Parameter wurden – um eine möglichst schnelle und effiziente Abtauung zu gewährleisten – in Anlehnung an [3] angepasst.

Abschließend wurden Messungen des Gesamtprozesses (Wärmepumpenbetrieb mit Vereisung des Außenraumwärmetauschers sowie Enteisung mit gleichzeitigem PTC-Heizbetrieb) durchgeführt. Dabei wurde wiederum auf eine konstante Kältemiteleintrittstemperatur in den Gaskühler geregelt. Um trotzdem während der Vereisung und Enteisung eine konstante Heizleistung des Systems zu gewährleisten, wurde die fehlende Heizleistung durch einen PTC-Zuheizer kompensiert. Für die Beurteilung der Effizienz des Wärmepumpensystems wurde der zeitliche Mittelwert des COP

($\overline{\text{COP}}$), der den Gesamtzyklus (Heiz- und Enteisungsbetrieb) berücksichtigt, nach Gl. 1 berechnet. Dabei stellt \dot{Q}_{Heiz} die gesamte Heizleistung des Systems, P_{Komp} die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors und P_{PTC} die elektrische Leistung des PTC-Zuheizers dar.

Gl. 1	$\overline{\text{COP}} = \frac{\int \dot{Q}_{\text{Heiz}} dt}{\int (P_{\text{Komp}} + P_{\text{PTC}}) dt}$
--------------	--

BILD 3 zeigt die energetische Betrachtung eines Vereisungs-Enteisungs-Zyklus mit zusätzlicher elektrischer Beheizung und einem sich ergebenden $\overline{\text{COP}}$ von 1,81. Nachdem der COP während des Vereisungsvorgangs zwischen 3,0 und 2,1 lag, verdeutlicht dieses Beispiel, dass der Enteisungsvorgang sowie eine notwendige zwischenzeitliche Beheizung der Fahrgastzelle einen wesentlichen Einfluss auf den COP des gesamten Zyklus haben.

Ziel war es nun, die Parameter des Enteisungsprozesses (mit dem Enteisungszeitpunkt als wichtigstem Parameter) so zu wählen, dass der $\overline{\text{COP}}$ des Gesamtprozesses ein Maximum erreicht.

MODELLBILDUNG UND SIMULATION

Um den Umfang der zeit- und kostenintensiven Prüfstandsmessungen zu reduzieren, wurde ein Simulationsmodell des Kältekreislaufs inklusive Wärmetauscher mit Eisschicht erstellt, mit dem sowohl Vereisungsvorgänge als auch Abtauvorgänge simuliert werden können. Dies geschah unter Verwendung der Modellierungs- und Simulationsumgebung Dymola sowie der dafür erhältlichen Bibliothek AirConditioning Library [4]. Die modellierte(n) Eisschicht(en) mit einheitlicher Temperatur und variabler Dicke sind zwischen der Wand des diskretisierten Wärmetauschers und der Luftseite angeordnet, **BILD 4**, und basieren auf der Arbeit von Proelss und Schmitz [5]. Um Vereisungs- und Abtauvorgänge anschaulich darstellen zu können, wurde ein Modell erstellt, mit dem die Visualisierung der Eisdicke auf einem Wärmetauscher mit einer bestimmten Diskretisierung möglich ist. **BILD 5** zeigt ein Beispiel für die erstellte Visualisierung des Außenraumwärmetauschers während eines simulierten Enteisungsvorgangs. Die Modelle für den Kältemittelverdichter sowie die Wärmetauscher wurden mit den vorhandenen Messdaten kalibriert.

Mit dem entwickelten Simulationsmodell können verschiedenste Einflussgrö-

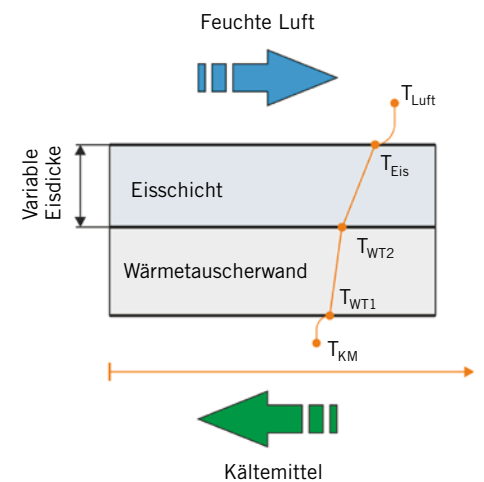


BILD 4 Schematische Darstellung des Wärmetauschermodells mit Eisschicht

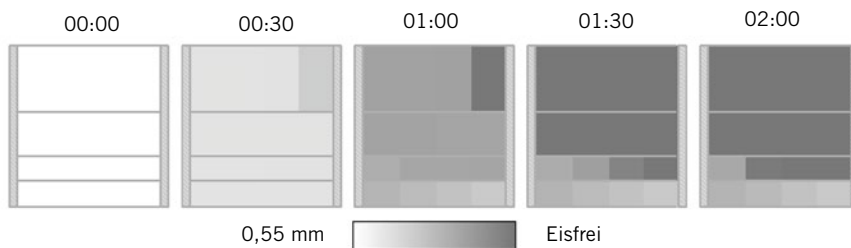


BILD 5 Visualisierung der simulierten Eisdicken-Verteilung am Außenraumwärmetauscher während des Enteisungsprozesses (Zeit im Format mm:ss)

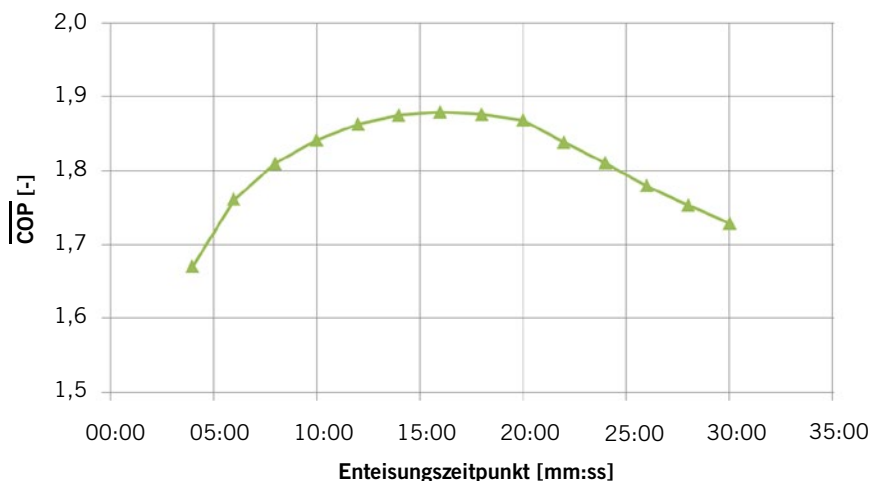


BILD 6 Simulationsergebnisse für den \overline{COP} in Abhängigkeit des gewählten Enteisungszeitpunkts

ßen auf die Eisbildung und Varianten für die Regelung des Enteisungsprozesses untersucht werden. Im Fokus lag bisher der Einfluss des Enteisungszeitpunkts auf die Effizienz des Gesamtprozesses. **BILD 6** zeigt die Auswertung der Simulationsergebnisse für den \overline{COP} in Abhängigkeit vom gewählten Enteisungszeitpunkt bei gleichbleibenden Randbedingungen und konstanten Parametern des Enteisungsprozesses (Kompressordrehzahl und Öffnung des Expansionsventils). Es ist ein Maximum des \overline{COP} bei einem Startzeitpunkt der Enteisung nach circa 16 min ersichtlich. Eine früher oder später durchgeführte Enteisung führt in diesem Fall zu einer niedrigeren Effizienz des Gesamtzyklus, wobei sich für das betrachtete System eine zu früh durchgeführte Enteisung stärker negativ auswirkt als eine zu spät durchgeführte. Je nach verwendeter Methode zur Erkennung der Eisbildung konnte der \overline{COP} in Abhängigkeit von weiteren Parametern bestimmt werden (zum Beispiel Temperaturdifferenz zwischen Luft und Kältemittel am Außenraumwärmetauscher). Mit diesen Informationen wurde anschließend ein Kennfeld erstellt, das in Abhängigkeit

der Umgebungsbedingungen den jeweils energetisch optimalen Zeitpunkt zum Start des Enteisungsvorgangs ausgibt. Mit dieser Methode kann eine hohe Effizienz des Wärmepumpensystems trotz notwendiger Enteisung gewährleistet werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mithilfe der durchgeführten Prüfstandsmessungen sowie des erstellten Simulationsmodells konnte eine energetische Betrachtung des Gesamtzyklus im Wärmepumpenbetrieb (Vereisungs- und Enteisungsvorgang) durchgeführt werden. Die Simulationsergebnisse für den \overline{COP} in Abhängigkeit vom Enteisungszeitpunkt haben gezeigt, dass es (abhängig von den Umgebungsbedingungen und Prozessparametern) einen energetisch optimalen Enteisungszeitpunkt gibt, in dem die Systemeffizienz deutlich höher ist als bei zu früh oder zu spät gestartetem Enteisungsvorgang. Durch die Erstellung eines entsprechenden Kennfelds zur Bestimmung des energetisch optimalen Enteisungszeitpunkts abhän-

gig von den Umgebungsbedingungen und Prozessparametern konnte eine hohe Effizienz des Gesamtprozesses des Wärmepumpensystems gewährleistet werden. Die hier vorgeschlagene Vorgehensweise kann auch auf ähnliche Systeme und Anwendungsfälle übertragen werden, sofern die Erstellung eines entsprechenden Simulationsmodells möglich ist. Für zukünftige Anwendungen sollen weitere Parameter in das Kennfeld für den optimalen Enteisungszeitpunkt miteinfließen und die Simulationsergebnisse durch entsprechende Prüfstandsmessungen validiert werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Steiner, A.: Untersuchung von Konzepten zur Innenraumkonditionierung von Fahrzeugen mit Elektroantrieben unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs. Technische Universität Graz, Dissertation, 2014
- [2] Steiner, A.; Rieberer, R.: Investigation of a reversible cooling and heating system for electric vehicles using CO₂ as working fluid under frosting conditions. 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Delft, Niederlande, 2012
- [3] Steiner, A.; Rieberer, R.: Parametric analysis of the defrosting process of a reversible heat pump system for electric vehicles. In: Applied Thermal Engineering, Volume 61 (2013), S. 393-400
- [4] Modelon AB: AirConditioning Library (Version 1.8) – Users Guide. Modelon AB, Lund, Sweden, 2010
- [5] Proelss, K.; Schmitz, G.: Modeling of frost growth on heat exchanger surfaces. Proceedings of the 5th Modelica Conference, Vienna, Austria, 2006, S. 509-516

DANKE

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung des Comet-Programms (Competence Centers for Excellent Technologies) des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), des Österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMWFW), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG). Ebenfalls danken sie den unterstützenden Firmen und der Technischen Universität Graz.



DOWNLOAD DES BEITRAGS

www.springerprofessional.de/ATZ



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now:

springervieweg-service@springer.com