

Absorptionskältemaschine · Yazaki · Kälteleistung · COP · Teillast · Anfahrverhalten

Vorgestellt werden stationäre Vermessungen von Kälteleistung und COP der Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC5 in Abhängigkeit der Eintrittstemperaturen in den drei Kreisen und des Volumenstroms im Antriebskreis. Versuche zum dynamischen Anfahrverhalten und zum Taktverhalten komplettieren das Bild vom Betriebsverhalten der Maschine.

Measurement of Yazaki absorption chiller WFC-SC5

absorption chiller · Yazaki · cooling capacity · cop · part load · start-up behaviour

Stationary measurements of cooling capacity and cop of Yazaki absorption chiller WFC-SC5 subject to the three inlet temperatures and to the heating circuit volume flow are presented. Experiments concerning the dynamic start-up behaviour and the cyclic operation complete the idea of the machines' operating behaviour.



Autoren

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam (li.)

E² – Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Fachhochschule Düsseldorf
Sandra Lohmann, M.Sc. (re.)

E² – Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Fachhochschule Düsseldorf

Vermessung der Yazaki-Absorptionskältemaschine WFC-SC5

Einleitung

Die Arbeitsgruppe E² – Erneuerbare Energien und Energieeffizienz im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Fachhochschule Düsseldorf betreibt unter anderem die Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC5 an einem Hardware-in-the-Loop-Prüfstand. Im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojektes wurden stationäre Vermessungen der Kälteleistung und des COP in Abhängigkeit der drei Eintrittstemperaturen durchgeführt [1], [2], [3], [4]. Eine Vermessung in Abhängigkeit des Volumenstromes im Heizkreis und Versuche zum dynamischen Anfahrverhalten komplettieren das Bild vom Betriebsverhalten der Maschine.

Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC5

Die Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC5 (s. Abb. 1) arbeitet mit dem Stoffpaar Wasser (H₂O) / Lithiumbromid (LiBr). Am Nennbetriebspunkt stellt sie laut Hersteller 17,6 kW Kälteleistung mit einem Coefficient of Performance (COP) von 0,7 bereit. Tabelle 1 enthält die entsprechenden Leistungen, Ein- und Austrittstemperaturen und Volumenströme der drei Kreise, sowie den COP am Nennbetriebspunkt [5].

Vermessung

Die Bestimmung der Leistungen und des COP der AKM erfolgte in einem 3-stufigen Raster in Abhängigkeit der drei Eintrittstemperaturen im Antriebs(HT)-, Rückkühl(MT)- und Kälte(NT)-Kreis insgesamt 3³ = 27 stationären Betriebspunkten (s. Tab. 2). Die Nutzung der NT-Eintrittstemperatur als Parameter anstelle der sonst häufig genutzten NT-Austrittstemperatur hat folgende Gründe: Die Eintrittstemperatur ist am Prüfstand leichter einstellbar und ein auf die Messdaten zurückgreifendes Simulationsmodell des Geräts kommt ohne Iteration aus. Die Volumenströme in den drei Kreisen betrugen bei den Messungen 4,33 m³/h (HT), 9,16 m³/h (MT) und 2,74 m³/h (NT), was recht genau den vom Hersteller geforderten Nennvolumenströmen entspricht. Beim Anfahren der Betriebspunkte wurde Behar-

rung (Konstanz von Temperaturen und Leistungen) abgewartet. Die Messdauer jedes Betriebspunktes betrug 30 Minuten, über die die Messdaten gemittelt wurden.

Stationäres Kennfeld

Vier Punkte des 3er-Gitterrasters aus den drei Eintrittstemperaturen konnten nicht bei den gewünschten Temperaturen gemessen werden. Bei dreien liegt die erreichte Kaltwasseraustrittstemperatur an der Ausschaltgrenze der AKM-internen Regelung, sodass die Pumpe des Antriebskreises abschaltet und die AKM anfängt zu takten. Um das Takten zu vermeiden, wurde die Generatoreintrittstemperatur (Antriebskreiseintrittstemperatur, T_{HT_IN}) geringfügig verringert. Der vierte Punkt erfordert eine Antriebsleistung von über 30 kW, die der genutzte Prüfstand nicht zur Verfügung stellen konnte.



Yazaki WFC-SC5 [5]

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die gemessenen Kälteleistungen und den COP der Yazaki WFC-SC05, aufgetragen über der Generatoreintrittstemperatur, sowie Trendlinien zwischen den Messpunkten.

Wie erwartet, steigt die Kälteleistung mit steigender Generatortemperatur (höhere treibende Temperaturdifferenz im Generator → mehr Kältemittel kann ausgetrieben werden) und sinkender Rückkühleintrittstemperatur (Kältemittel wird besser kondensiert und unterkühlt, sowie bessere Abfuhr der Absorptionswärme, d.h. auch bessere Absorption). Die Kältekreiseintrittstemperatur hat nur bei hohen Generatoreintrittstemperaturen einen nennenswerten Einfluss. Dabei steigt die Kälteleistung mit steigender Kältekreiseintrittstemperatur (höhere treibende Temperaturdifferenz im Verdampfer → Kältemittel kann besser verdampft werden).

Der COP besitzt, über der Generatoreintrittstemperatur aufgetragen, einen nichtlinearen Verlauf. Bei höheren Generatoreintrittstemperaturen wird die COP-Zunahme geringer bzw. der COP nimmt bei ansonsten konstanten Randbedingungen wieder ab. In Abbildung 3 ist eine quadratische Trendlinie gewählt. Der Einfluss der Generatoreintrittstemperatur auf den COP sinkt mit sinkender Rückkühleintrittstemperatur. Ein Einfluss der Kältekreiseintrittstemperatur ist wiederum nur bei hoher Generatoreintrittstemperatur vorhanden.

Über die Ursachen der Wirkungsgradabnahme bei hohen Generator- und Rückkühlkreiseintrittstemperaturen kann ohne genauere Untersuchung keine abschließende Aussage getroffen werden. Eine mögliche Ursache ist der sich verschiebende Zustand des Kältemittels beim Eintritt in den Verdampfer. Der Zustand des Kältemittels nach der Drosselung liegt im Zweiphasengebiet und nur der flüssige Teil des Kältemittels steht für die Wärmeaufnahme im Verdampfer zur Verfügung. Je schlechter die Unterkühlung des Kältemittels (bei hoher Generator- und Rückkühltemperatur), desto größer die Wirkungsgradabnahme.

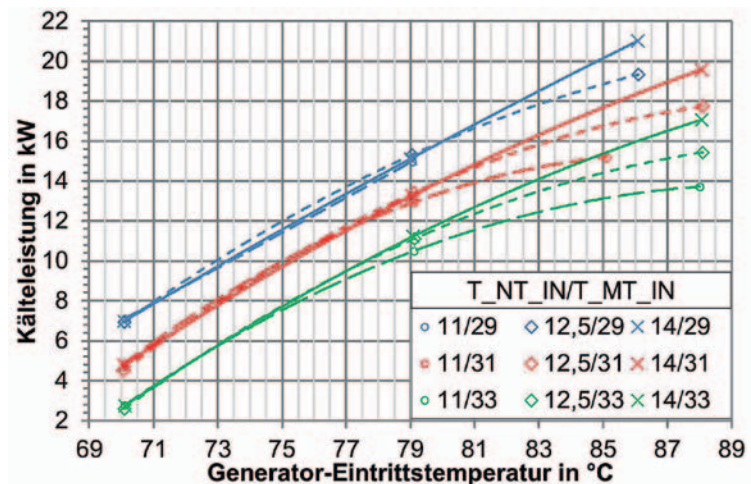
Streuung am Nennbetriebspunkt

Sechs Messungen am Nennbetriebspunkt (88 °C HT, 31 °C MT, 12,5 °C NT) dienen der Ermittlung der statistischen Messunsicherheit der Versuche [6]. Alle drei Eintrittstemperaturen lassen sich am Prüfstand mit sehr geringer Streuung einstellen.

1 Nenndaten Yazaki WFC-SC5 [5]

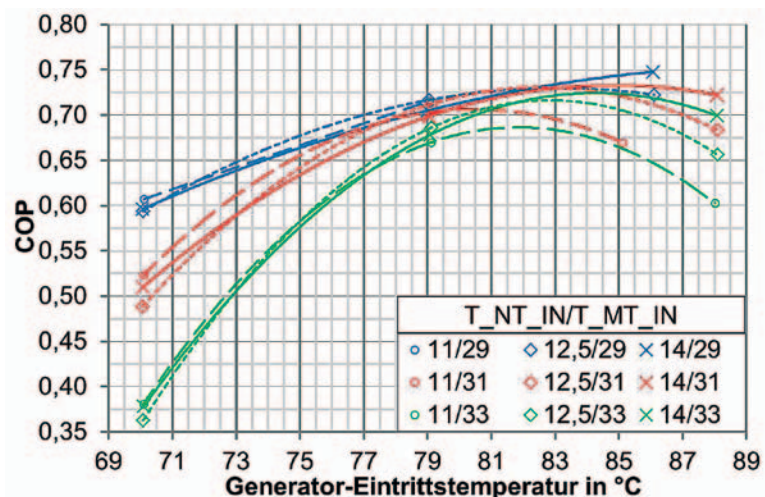
Stoffpaar		H ₂ O/LiBr		
COP	-	0,7		
		Antriebskreis (HT)	Rückkühlkreis (MT)	Kältekreis (NT)
Leistung	kW	25,1	42,7	17,6
Eintrittstemperatur	°C	88 (70..95)	31	12,5
Austrittstemperatur	°C	83	35	7
Volumenstrom	m ³ /h	4,32	9,18	2,77

2



Kälteleistung über der Generator-Eintrittstemperatur bei verschiedenen Kältekreis- und Rückkühlkreis-Eintrittstemperaturen (T_{NT_IN} , T_{MT_IN})

3



COP über der Generator-Eintrittstemperatur bei verschiedenen Kältekreis- und Rückkühlkreis-Eintrittstemperaturen (T_{NT_IN} , T_{MT_IN})

len. Tabelle 3 enthält die Mittelwerte, die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten der Leistungen und des COP der sechs Versuche. Die Variationsko-

effizienten liegen zwischen 0,2 und 0,9%. Die Streuung aller Werte ist somit gering. Im Nennbetriebspunkt liegt der COP bei 0,68 um 2 Prozentpunkte unter den

2 Stufen des Kennfelds

T_HT_IN	70	79	88	°C
T_MT_IN	29	31	33	°C
T_NT_IN	11	12,5	14	°C
3 ³ = 27 mögliche Kombinationen				

Herstellerangaben. Die gemessene Kälteleistung ist mit 17,934 kW um 0,334 kW größer als die Angabe des Herstellers, die Heizleistung um 1,282 kW höher als die angegebenen 25,1 kW. Diese Differenzen liegen mit 1,9 bzw. 5,1 % etwas über der absoluten Messgenauigkeit

des verwendeten Prüfstandes (im Heizkreis entsprechen 1,282 kW einem ΔT von 0,26 K).

Abhängigkeit vom HT-Volumenstrom

Vermessungen der Leistungen und des COP unter Variation des Volumenstromes im Antriebskreis der AKM an drei Betriebspunkten dienen der Ermittlung des Einflusses des Volumenstromes [6]. Die drei untersuchten Betriebspunkte sind der Nennbetriebspunkt P1 (88/31/12,5), der Punkt mit minimaler Kälteleistung aus den bisherigen Vermessungen P3 (70/33/12,5) und ein Punkt mit dazwischen liegenden Temperaturen im HT- und MT-Kreis P2 (79/32/12,5). Der Volumenstrom wurde jeweils auf drei Stufen variiert: minimaler Volumenstrom (1,2 m³/h), mittlerer Volumenstrom (2,7 m³/h) und Nennvolumenstrom (4,3 m³/h). Abbildung 4 zeigt die ermittelten Messwerte für Kälteleistung und COP.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion des Volumenstroms im Antriebskreis von 4,3 m³/h auf 1,2 m³/h zu einer Verminderung der Kälteleistung führt: Am Nennbetriebspunkt P1 sind dies 2,9 kW bzw. 16 %, bei P2 3,7 kW bzw. 31 % und bei P3 1,1 kW bzw. 47 %.

Der COP verhält sich uneinheitlich: Während er mit Verringerung des Volumenstroms am Nennbetriebspunkt P1 leicht ansteigt, stagniert er bei P2 und sinkt bei P3.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Temperatur im Antriebskreis (T_{HT_IN}) einen größeren Einfluss auf die Kälteleistung besitzt als der Volumenstrom im Antriebskreis. Ist die Temperatur jedoch bereits auf ein Minimum reduziert, kann der Volumenstrom gut als zweites Stellglied zur weiteren Reduzierung der Kälteleistung genutzt werden. Die Kälteleistung der Maschine ist somit im hier vermessenen Kennfeld von 1,3 bis 21 kW skalierbar, ohne dass die Kältemaschine in den energetisch ungünstigen Taktbetrieb übergeht. Bei kleinen Kälteleistungen um die 2 kW liegt der COP jedoch mit Werten zwischen 0,25 und 0,35 unter der Hälfte des COP am Nennbetriebspunkt. Bei Taktbetrieb mit gleicher mittlerer Kälteleistung ist der COP noch geringer (siehe auch nachfolgendes Kapitel).

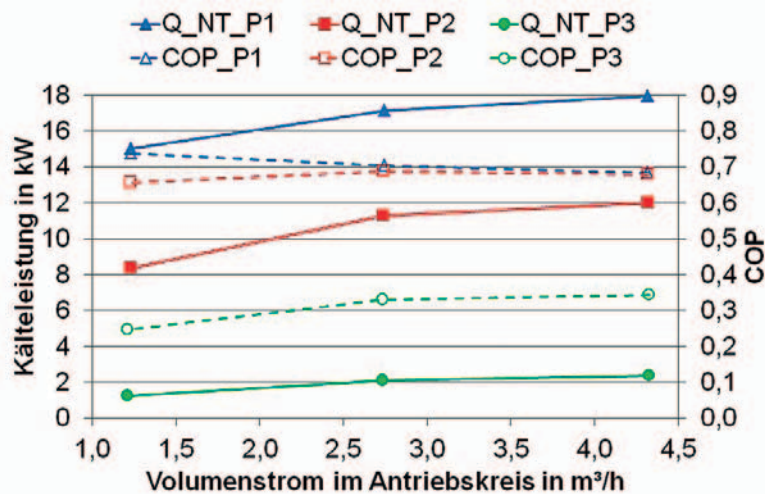
Taktbetrieb

Im Hardware-in-the-Loop-Versuch wurde das Verhalten der Yazaki-Kältemaschi-

3 Mittelwert \bar{Y} , Standardabweichung s und Variationskoeffizient $v = \bar{Y}/s$ der Leistungen und des COP

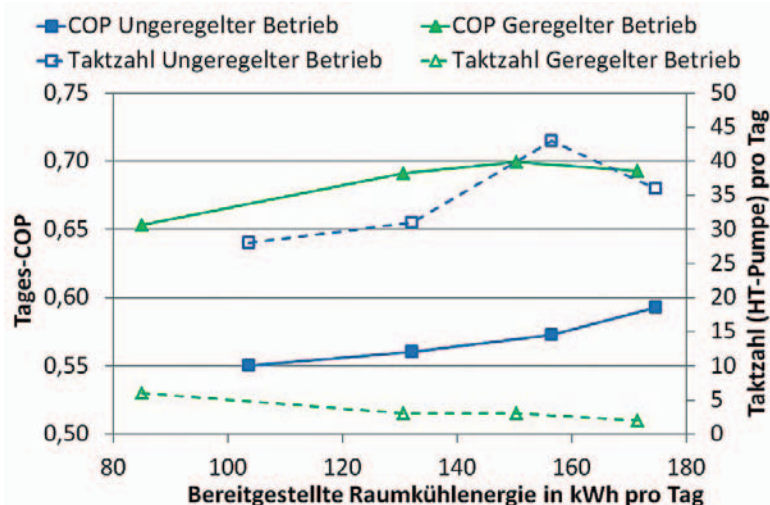
	Q_HT	Q_MT	Q_NT	COP
\bar{Y}	26,382 kW	43,509 kW	17,934 kW	0,680
s	0,045 kW	0,285 kW	0,135 kW	0,006
v	0,2 %	0,7 %	0,8 %	0,9 %

4



Kälteleistung und COP über dem Antriebskreisvolumenstrom an drei Betriebspunkten P1 (88/31/12,5), P2 (79/32/12,5), P3 (70/33/12,5)

5



COP und Taktzahl für einen Tagesbetrieb bei verschiedenen Lastzuständen

ne in einem System zur Solaren Kühlung bei verschiedenen Lastzuständen mit verschiedenen Regelungen getestet [1], [2]. Im unregelmäßigen An/Aus-Betrieb stellt sich ein Taktbetrieb ein. Im geregelten Betrieb wurde die Kälteleistung durch Reduzierung der Antriebskreis-Eintrittstemperatur an die Last angepasst und der Taktbetrieb dadurch deutlich reduziert. Abbildung 5 zeigt den Tages-COP und die Taktzahl der beiden Regelarten bei verschiedenen Lastzuständen. Der COP liegt im geregelten Betrieb mit 0,65 bis 0,7 um rund 0,1 höher als im Taktbetrieb mit 0,55 bis 0,6.

Ein geregelter Betrieb durch Anpassung der Temperaturen und/oder des Antriebskreisvolumenstromes ist also dem Taktbetrieb vorzuziehen.

Vermessung des dynamischen Verhaltens

Das dynamische Verhalten der AKM unterliegt neben thermodynamischen Einflüssen auch der maschineninternen Regel- und Steuerungstechnik. Das Anfahrverhalten ist exemplarisch in Abbildung 6 dargestellt [1]. Die Schwankungen im Heiz- und Rückkühlkreis werden durch die Regelung des verwendeten Prüfstandes verursacht.

Antriebskreis (HT)

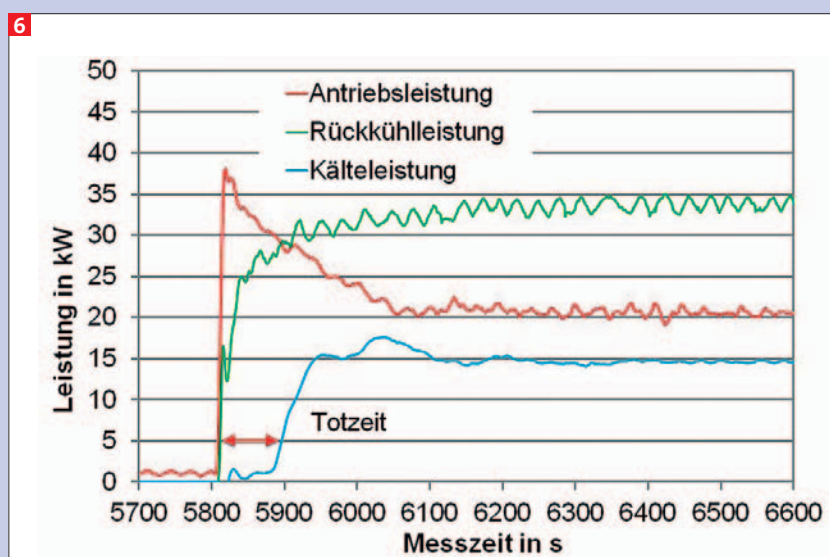
Beim Start der AKM steigt die Antriebsleistung zunächst stark an. Dies ist in der großen Temperaturdifferenz am Generator begründet, da die AKM beim dargestellten Versuch mit Umgebungstemperatur startet.

Kältekreis (NT)

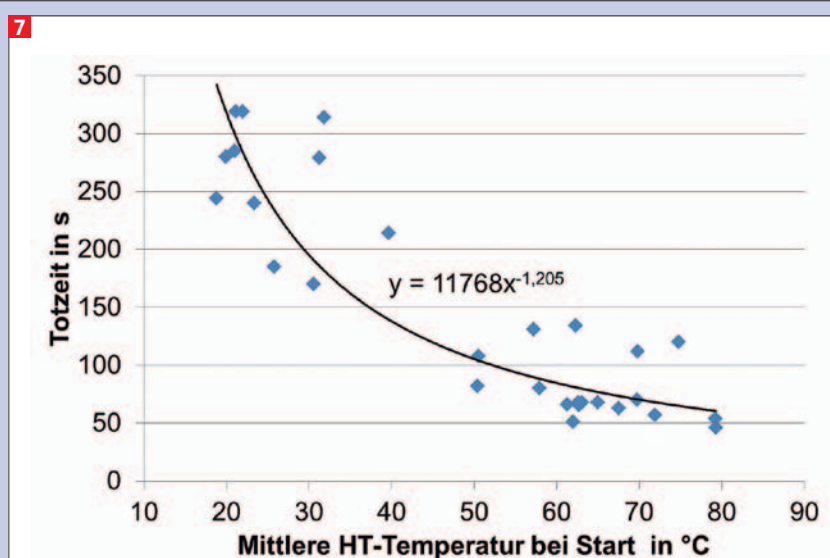
Die Kälteleistung setzt mit einem zeitlichen Verzug (Totzeit) zum Start der AKM (Anstieg Antriebsleistung) ein. Beim Start der AKM befindet sich zunächst hauptsächlich reiche Lösung in der Maschine. Erst wenn die Siedetemperatur im Generator erreicht ist und genügend Kältemittel ausgetrieben und anschließend vom Kondensator verflüssigt wurde, kann Kälteleistung am Verdampfer erzeugt werden. Die Dauer der Totzeit ist von der internen Maschinentemperatur und den Eingangstemperaturen im HT- und MT-Kreis abhängig.

Rückkühlkreis (MT)

Im stationären Betrieb gilt ohne die Berücksichtigung von Verlusten: Die Summe aus Antriebs- und Kälteleistung ergibt die Rückkühlleistung. Im dynamischen Betriebsverhalten ist dies



Exemplarischer Verlauf des dynamischen Anfahrverhaltens der Yazaki WFC-SC5



Totzeit zwischen Beginn der Beheizung und einsetzender Kälteleistung in Abhängigkeit von der mittleren HT-Temperatur

nicht anwendbar. Ein großer Teil der Antriebsleistung dient anfänglich, bis die Siedetemperatur erreicht wird, der Erwärmung des Generators und wird somit nicht über den Rückkühlkreis abgeführt.

Totzeit

Eine Analyse zur Abhängigkeit der Totzeit von verschiedenen extern messbaren Größen ergab die mittlere Antriebs(HT)-Temperatur bei Start der AKM als die am besten korrelierende Größe. Abbildung 7 zeigt die Totzeit der ausgewerteten Versuche in Abhängigkeit von der mittleren

HT-Temperatur. Die Regressionsfunktion lautet:

$$\text{Totzeit}_{NT} = 11768 \cdot (\bar{T}_{HT})^{-1,205}$$

Zusammenfassung

Stationäre Vermessungen der Kälteleistung und des COP an der Absorptionskältemaschine Yazaki WFC-SC5 in einem 3er-Gitterraster an $3^3 = 27$ Versuchspunkten bei Eintrittstemperaturen im Antriebs-, Rückkühl- und Kältekreis von 70..88 °C, 29..33 °C und 11..14 °C führen zu folgenden Erkenntnissen: Die Eintrittstemperaturen im Antriebs- und

Rückkühlkreis haben großen Einfluss auf die Kälteleistung und den COP, welche zwischen 2..21 kW und 0,35..0,75 variieren. Grundsätzlich steigt die Kälteleistung mit steigender Antriebs- und sinkender Rückkühltemperatur. Die Temperatur im Kältekreis hat hingegen nur bei hohen Antriebstemperaturen Einfluss auf die Kälteleistung. Dabei steigt die Kälteleistung mit steigender Kältekreis-Eintrittstemperatur an. Der COP zeigt bis zu einer Antriebstemperatur von ca. 79°C ein ähnliches Verhalten. Bei höheren Antriebstemperaturen sinkt der COP wieder ab, besonders stark bei hohen Rückkühltemperaturen.

Eine Reduktion des Volumenstromes im Antriebskreis von 4,3 m³/h auf 1,2 m³/h an drei exemplarischen Betriebspunkten bewirkt eine Verminderung der Kälteleistung um 16,47%. Der COP kann leicht ansteigen oder etwas absinken.

Die Kälteleistung ist durch Anpassung der Temperaturen in allen drei

Kreisen und des Volumenstromes im Antriebskreis im hier vermessenen Kennfeld von 1,3 bis 21 kW skalierbar, ohne dass die Kältemaschine in den Taktbetrieb übergeht. Bei kleinen Kälteleistungen (um die 2 kW) liegt der COP jedoch mit Werten zwischen 0,25 und 0,35 unter der Hälfte des COP am Nennbetriebspunkt. Bei Taktbetrieb mit gleicher mittlerer Kälteleistung ist der COP deutlich geringer als im geregelten Betrieb.

Beim Anfahren besitzt die Kältemaschine vom Beheizungsbeginn an eine Totzeit bis zum Anstieg der Kälteleistung von 50 bis 350 s. Empirisch zeigt sich eine Korrelation der Totzeit mit der mittleren Antriebstemperatur beim Start der AKM.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die freundliche Unterstützung des Forschungsprojektes (FKZ: 17 42X 09).

Literatur

- [1] Adam, M., Goebel, J., Gottschald, J., Lohmann, S., Radosavljevic, R.: Solare Kühlung im Hardware-in-the-Loop-Test, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, April 2013
- [2] Adam, M., Goebel, J., Gottschald, J., Lohmann, S., Radosavljevic, R.: Solare Kühlung im Hardware-in-the-Loop-Test, DKV-Tagungsbericht 2012, Würzburg
- [3] Lohmann, S., Thesing, M., Adam M.: Solare Kühlung – Dynamische Rechnersimulationen und DoE-unterstützte Parametervariationen, DKV-Tagungsbericht 2010, Magdeburg
- [4] Adam, M., Lohmann, S.: Solare Kühlung - Dynamische Rechnersimulationen und Parametervariationen. KI Luft- und Kältetechnik, Ausgabe 05, 2011, S. 22-26
- [5] Yazaki: Spezifikationen WFC-SC5, Vers. 9-1
- [6] Götzelmann, D.: Energietechnische Projektstudie „Absorptions-Kältemaschine Yazaki WFC SC 05: Prüfstand-Vermessung von Leistung und COP in Abhängigkeit des Volumenstroms im Heizkreis“, Mai 2013

Das Web-Portal der KI



Täglich aktuelle
News und Infos!



www.ki-portal.de