

## Transformationsprozess von Produktionsmaschinen in einem industriellen Gleichstrommikronetz

# Energieeffizienz einer Kältemaschine im DC-Netz

L. Marra de Lima, J. Schwaiger, I. Bianchini, A. Sauer

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Steigerung der Energieeffizienz ist ein zentrales Ziel industrieller Strategien und gewinnt im Zuge der Energiewende weiter an Bedeutung. Besonders in thermischen Prozessen bestehen bislang ungenutzte Einsparpotenziale. Die Umrüstung einer hybriden Kältemaschine auf Gleichstrombetrieb zeigt exemplarisch, wie thermische Industrieanlagen effizienter betrieben werden können. Der Beitrag stellt eine systematische Umrüstungsmethode vor und bewertet deren Effizienzpotenziale.

## STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Forschung, Technologietransfer

## Chiller with a DC power supply and efficiency assessment

**ABSTRACT** Improving energy efficiency is gaining increasing importance in the context of the industrial energy transition. In particular, thermal processes offer untapped savings potential. Converting a hybrid chiller to direct current (DC) operation demonstrates how industrial systems can benefit from DC technology. This paper presents a systematic method for retrofitting a thermal system and evaluates the resulting efficiency gains.

## 1 Einleitung

In industriellen Fertigungsanlagen steigt der Energiebedarf elektrischer Antriebe und thermischer Prozesse im Zuge der Elektrifizierung kontinuierlich an. Damit wachsen sowohl der Bedarf an einer energieeffizienten Versorgungstechnik als auch das Potenzial, vorhandene Energieflüsse besser nutzbar zu machen. Vor allem in heutigen Wechselstrom-Versorgungssystemen (AC-Versorgungssystemen) entstehen aufgrund mehrstufiger Umwandlungsstrukturen und begrenzter Rückspeisemöglichkeiten erhebliche Verluste [1, 2], wodurch Brems- oder Prozessenergie meist ungenutzt bleibt und in Abwärme umgewandelt wird.

Die Umstellung von Produktionsmaschinen auf eine Versorgung mit Gleichstrom (DC) bietet einen alternativen Ansatz, um diese Verluste zu reduzieren, Rekuperationspotenziale nutzbar zu machen und dezentrale Energiequellen effizienter einzubinden [3]. Auch erleichtern DC-Systeme durch ihren einfachen Aufbau die Integration von Speichersystemen und Photovoltaikanlagen [3]. Frühere Forschungsarbeiten im Bereich industrieller DC-Versorgungssysteme haben gezeigt, dass Gleichstromnetze geringere Wandlungsverluste, eine höhere Energieeffizienz sowie Vorteile hinsichtlich der Versorgungssicherheit haben [2, 4].

Obwohl es bereits einige DC-fähige Einzelkomponenten gibt, sind viele industrielle Produktionsmaschinen weiterhin allein auf einen AC-Betrieb ausgelegt [5]. Insbesondere thermische Anlagen wie industrielle Kältemaschinen oder Wärmepumpen wurden bisher kaum auf einen Gleichstrombetrieb untersucht. Die Umrüstung einer Kraftwärmemaschine auf einen Gleichstrombetrieb ist eine wesentliche technologische Weiterentwicklung, da sie zwei bislang weitgehend getrennte Sektoren miteinander verknüpft:

thermische Energiesysteme und industrielle DC-Versorgungstechnik. Durch die Kombination entstehen neue Ansätze für eine energieeffiziente, ressourcenschonende und zukunftsfähige Bereitstellung industrieller Kälte- und Wärmeerzeugung.

Das Forschungsprojekt „DC-CoolTec“ adressierte genau diesen Ansatz. Im Projekt wurde eine bestehende hybride Kältemaschine mithilfe einer systematischen Umrüstungsmethode auf Gleichstromversorgung umgestellt und anschließend hinsichtlich ihrer Energieeffizienz nach der Umrüstung untersucht.

Ziel dieser Veröffentlichung ist es, den Transformationsprozess der Kältemaschine für den Gleichstrombetrieb methodisch zu beschreiben, die notwendigen technischen Anpassungen zur Umrüstungsmethode zu identifizieren und die Übertragbarkeit der bestehenden Methode sowie die Auswirkungen der Umrüstung auf die Energieeffizienz zu bewerten. Die Ergebnisse sollen zeigen, inwieweit sich der Ansatz auf weitere thermische Produktionsanlagen übertragen lässt und welchen Beitrag Gleichstromsysteme zur Steigerung der Energieeffizienz in industriellen Anwendungen leisten können.

## 2 Anwendung der Umrüstungsmethode

Die Umrüstung der Kältemaschine im Rahmen dieser Arbeit wurde durchgeführt im Transferzentrum Stuttgart des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP). Das Transferzentrum selbst ist im Forschungsprojekt „DC-Industrie2“ entstanden [4]. Die Umrüstung erfolgte im separaten Forschungsprojekt „DC-CoolTec“.

Die Umrüstungsmethode ist als strukturiertes Vorgehensmodell konzipiert und orientiert sich am System-Engineering-

Ansatz. Die Methode wird allgemeingültig formuliert und ist so gestaltet, dass sie auf unterschiedliche Produktionsmaschinen übertragbar ist [6]. Ihre Allgemeingültigkeit ergibt sich aus einer bewusst offenen Formulierung, die interne Grenzen definiert, aber keine spezifischen Maschinenarchitekturen voraussetzt. Der Umrüstungsprozess umfasst vier Phasen: die Spezifikationsphase, die Systemanalysephase, Beschaffungsphase sowie die Ergebnisphase. Jede dieser Phasen besteht aus Abläufen, welche als eigenständige Handlungsschritte definiert sind und klare Teilergebnisse liefern, die für die nächsten Abläufe benötigt werden [5].

Kältemaschinen besitzen in der Regel mehrere elektrisch angetriebene Komponenten wie Kompressor, Pumpen oder Ventilatoren sowie zusätzliche Leistungsaufnehmer, etwa Magnetventile oder interne Netzteile. Im Folgenden wird dargestellt, wie diese Methode auf die hybride Kältemaschine angewendet wurde und welche Ergebnisse sich aus den vier Phasen ableiten lassen.

## 2.1 Spezifikationsphase und Systemanalysephase (Phase I und Phase II)

Die erste Phase (Spezifikationsphase) umfasst das Sammeln von Informationen und Daten der Kältemaschine und ihrer Stromversorgung, sowie des Gleichstrommikronetzes im Transferzentrum. Auf dieser Basis lassen sich die Randbedingungen, der Systemaufbau und die systembedingten Einschränkungen identifizieren, die für den Umrüstungsprozess relevant sind.

Die Kältemaschine ist hybrid, das heißt, Kälte kann sowohl kompressionsbetrieben als auch adsorptionsbetrieben bereitgestellt werden. Das Adsorptionskälteaggregat hat eine thermische Nennleistung von 16,7 kW und arbeitet mit zwei zyklisch laufenden Prozessmodulen. Der Kompressionskältekreis liefert mit einem Asynchronmotor mit 4 kW elektrischer Nennleistung eine thermische Leistung von 15 kW. Damit verfügt die Kältemaschine über zwei Kältekreisläufe, einen Mischspeicher und einen Pufferspeicher sowie eine der Komplexität entsprechende Anzahl an Ventilen, Pumpen und Rohrleitungen.

Das DC-Netz im Transferzentrum basiert hinsichtlich seiner Spezifikationen auf der VDE Spec 90037 [4]. Zu den wichtigsten Spezifikationen des DC-Netzes zählen: ein Spannungsniveau mit einer Nennspannung von 650 V, das sich gemäß der vorgegebenen Regelkennlinie innerhalb des erlaubten Spannungsbereichs bewegt; ein Active Infeed Converter (AIC), der dem DC-Netz eine Leistung von bis zu 42 kW bereitstellen kann, sowie mehrere Sektoren, die den Anschluss von Geräten und Anlagen erlauben und durch geeignete Schutzorgane abgesichert sind.

In der zweiten Phase (Systemanalysephase) wurden die in der Spezifikationsphase gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für eine strukturierte Analyse der Maschinenstruktur herangezogen. Auf dieser Basis wurden ein Funktionsmodell sowie ein Flussgrößenschema der Kältemaschine abgeleitet, analog zum Vorgehen in [6]. Das Funktionsmodell untergliedert die Gesamtanlage in einzelne Funktionseinheiten und erlaubt eine übersichtliche Darstellung der funktionalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilsystemen. Zudem dient das Flussgrößenschema dazu, die Veränderungen der elektrischen Größen aufzuzeigen und innerhalb der Anlage zu identifizieren, wo sie auftreten. Es orientiert sich dabei am Verlauf des elektrischen Energieflusses.

Aufgrund des komplexen Aufbaus der hybriden Kältemaschine und um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurden, im Vergleich zum Vorgehen in [6], an den genannten Schemata kleine Anpassungen vorgenommen.

Die Anpassungen umfassten insbesondere die Differenzierung zwischen AC- und DC-Stromflüssen sowie zwischen einphasigen und dreiphasigen Leitungsstrukturen.

Als nächster Schritt wurde der Entscheidungsbaum-Algorithmus gemäß [6] zur Bewertung aller Bauteilfunktionen angewendet, um die Tauglichkeit der Komponenten zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Bewertung bildeten die Basis für die Ableitung eines angepassten Flussgrößenschemas der umgerüsteten DC-Kältemaschine.

Die **Tabelle** zeigt die relevanten Entscheidungen im Transformationsprozess für die wichtigsten Bauteile der hybriden Kältemaschine.

Der Hauptverbraucher, also der Kompressor, konnte mithilfe des bestehenden Umrichters der Kältemaschine direkt aus dem DC-Mikronetz versorgt werden, indem eine direkte DC-Einspeisung realisiert und entsprechende Parameteranpassungen am Umrichter vorgenommen wurden. Daher war für den Kompressor und den Umrichter kein Bauteilaustausch erforderlich.

Im Fall dieser Kältemaschine wurde beschlossen, einen internen AC-Bus für die Nebenverbraucher der Anlage (wie Ventile, Pumpen, Elektronik) umzusetzen. Nach einer Untersuchung der Pumpen, Ventile und weiterer relevanter Komponenten zeigte sich, dass wegen der fehlenden vergleichbaren DC-Komponenten auf dem Markt die Umstellung auf DC eine grundlegende Neukonstruktion und Dimensionierung der Kältemaschine erfordern würde. Daher wurde ein hybrides Versorgungskonzept entworfen, das einen einphasigen AC-Bus in der Kältemaschine vorsieht und dennoch eine zentrale Versorgung der Anlage über DC ermöglicht. Zwar wurden für die Versorgung der Nebenverbraucher zusätzliche Wandlungsstufen integriert, jedoch ließ sich dadurch der Umrüstaufwand erheblich reduzieren, ohne den grundlegenden Aufbau der Kältemaschine zu verändern. Dabei wurden die Sicherheitsvorschriften für den lokalen AC-Bus, insbesondere hinsichtlich der sicheren Energieversorgung zur Auslösung von Schutzvorrichtungen, berücksichtigt. Gleichzeitig wurden zeitintensive Neuanfertigungen einzelner Komponenten vermieden, was eine praxistaugliche Umsetzung der Umrüstung ermöglichte.

## 2.2 Beschaffungsphase und Ergebnisphase (Phase III und Phase IV)

Nach dem finalen Umbaukonzept für die Kältemaschine begann die dritte Phase, die Beschaffungsphase. In dieser Phase wurden alle für die Umrüstung erforderlichen Komponenten beschafft. Die Komponenten konnten durch genaue Spezifikation und mit etwas Lieferzeit über den elektrotechnischen Großhandel besorgt werden. Als sämtliche Bauteile zur Verfügung standen, erfolgte der eigentliche Umbau der Anlage.

Für die Umrüstung der Kältemaschine wurde ein zusätzlicher Schaltschrank aufgebaut (**Bild 1**), der in Verbindung mit dem bestehenden Schaltschrank den Gleichstrombetrieb durch die Versorgung aus dem DC-Mikronetz mit einer Nennspannung von 650 V ermöglicht. Anpassungen an der Steuerungssoftware der Anlage waren lediglich in Form von Parameteränderungen am Umrichter erforderlich. Nach dem Abschluss des Umbaus wurde ein aktualisierter Schaltplan erstellt und die Funktionalitäten der Kältemaschine getestet, bevor mit der Ergebnisphase begonnen wurde.

In der Ergebnisphase wurde die energetische Effizienz bewertet. Zur Bewertung wurden vergleichende Versuchsreihen im AC-

**Tabelle** Entscheidungen im Transformationsprozess für die wichtigsten Bauteile der Kältemaschine.

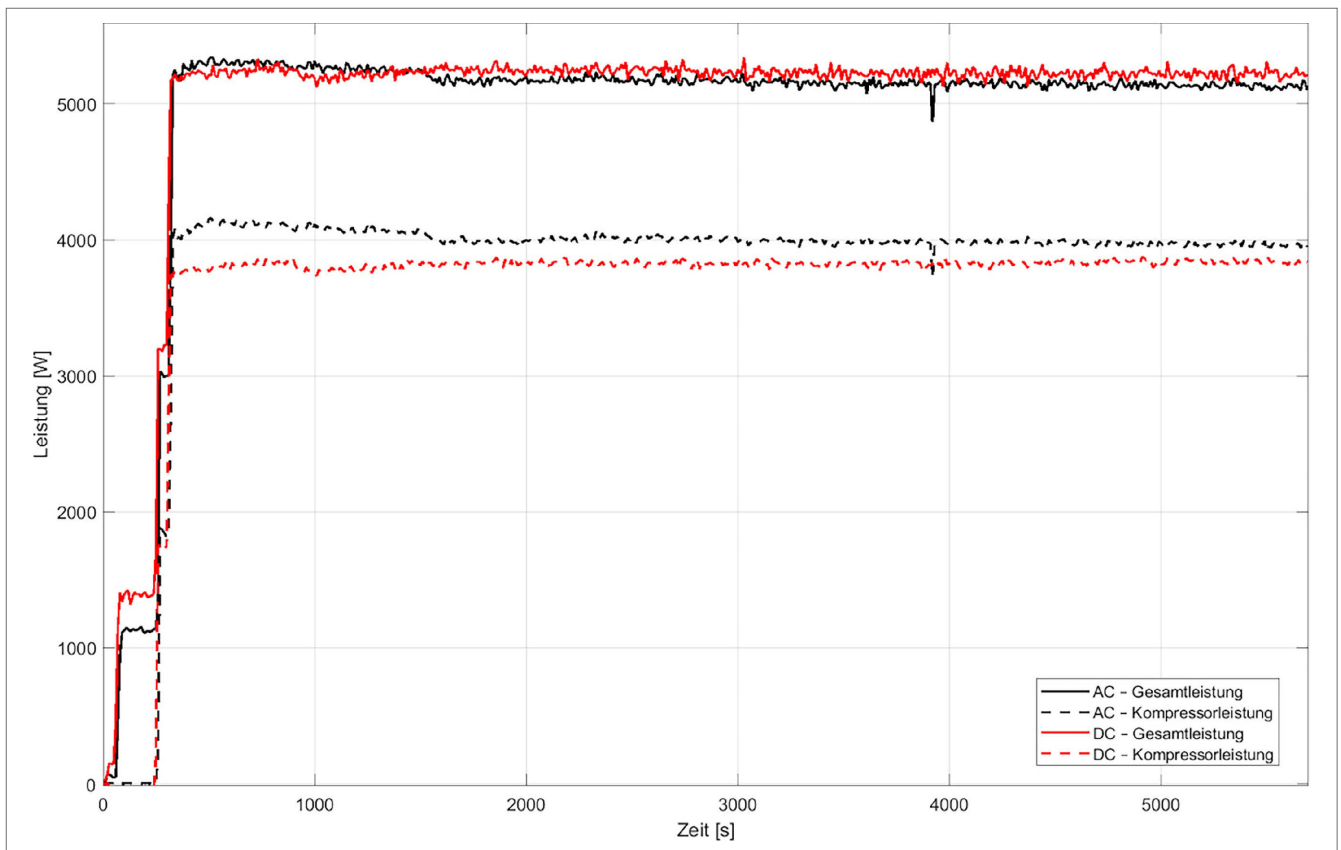
Bauteil	Funktion	Entscheidung			
		beibehalten	ersetzen	hinzufügen	entfernen
Netzstecker	Anschließen an das Versorgungsnetz (dreiphasig)		X		
Hauptschalter	Maschine schalten		X		
Sicherungen	Vor Überlast schützen		X		
Umrichter (Filter integriert)	Leistung stellen	X			
Asynchronmotor (Kompressor)	Medium verdichten	X			
Permanentmagnet-Synchronmotor (Pumpen)	Medium bewegen	X			
Besprühung	besprühen	X			
Heizung	heizen	X			
Ventile	Durchfluss steuern	X			
AC/DC-Wandler	Leistung stellen	X			
Thermostatschalter	temperaturabhängig schalten	X			
Mischventil	Medium mischen	X			
Elektroniken/SPSs	Aktoren regeln/steuern	X			
Motor (Schaltschranklüfter)	Schaltschrank lüften	X			
Radiometrischer Druckumwandler	Druck in elektrisches Signal umwandeln	X			
DC/DC-Wandler	Leistung stellen			X	
DC/AC-Wandler	Leistung stellen			X	



**Bild 1** Links: Zusätzlicher Schaltschrank der hybriden Kältemaschine und die Kältemaschine. Rechts: Innenansicht zusätzlicher Schaltschrank. Fotos: EEP Uni Stuttgart

Betrieb (vor der Umrüstung) und im DC-Betrieb (nach der Umrüstung) unter gleichen Szenarien im Kompressionsbetrieb durchgeführt. Durch den Anschluss der Kältemaschine an das hausinterne Kältenetz wurde eine vergleichbare Kälteabnahme über die Versuche hinweg gewährleistet. Bei der Versuchsdurch-

führung wurden relevante elektrische Messgrößen wie Spannung, Strom und Leistung erfasst. **Bild 2** zeigt die Ergebnisse einer Versuchsreihe, bei der die Leistung im AC- und DC-Betrieb gemessen wurde.



**Bild 2** Messdaten aus einer Versuchsreihe der hybriden Kältemaschine im AC (Wechselstrom)- und DC (Gleichstrom)- Betrieb. Grafik: EEP Uni Stuttgart

Die Auswertung zeigt, dass sich die Gesamtleistungsaufnahme der Kältemaschine im DC-Betrieb gegenüber dem AC-Betrieb nur leicht verändert. Dies ist auf das gewählte Versorgungskonzept mit internem AC-Bus für die Nebenverbraucher zurückzuführen. Wird ausschließlich die Leistungsaufnahme des Kompressors als Hauptverbraucher betrachtet, ergibt sich hingegen eine geringere elektrische Leistungsaufnahme im DC-Betrieb. Im Versuchsbeispiel in Bild 2 entspricht dies einem Effizienzgewinn von 4,8 % und vergleichbare Effizienzgewinne wurden auch in den Leistungsverläufen der weiteren Versuche beobachtet. Die in Bild 2 dargestellten Messwerte wurden bei einem Versuch bei Nennleistung im Kompressionskältebetrieb gemessen und entsprechen einer thermischen Leistung von circa 15 kW.

Aufgrund des hohen Energieverbrauchsanteils der Nebenverbraucher von etwa 25 % an der Gesamtleistung kompensieren die zusätzlichen Wandlungsverluste des internen AC-Bus (circa 80 %) den Effizienzvorteil des Hauptverbrauchers.

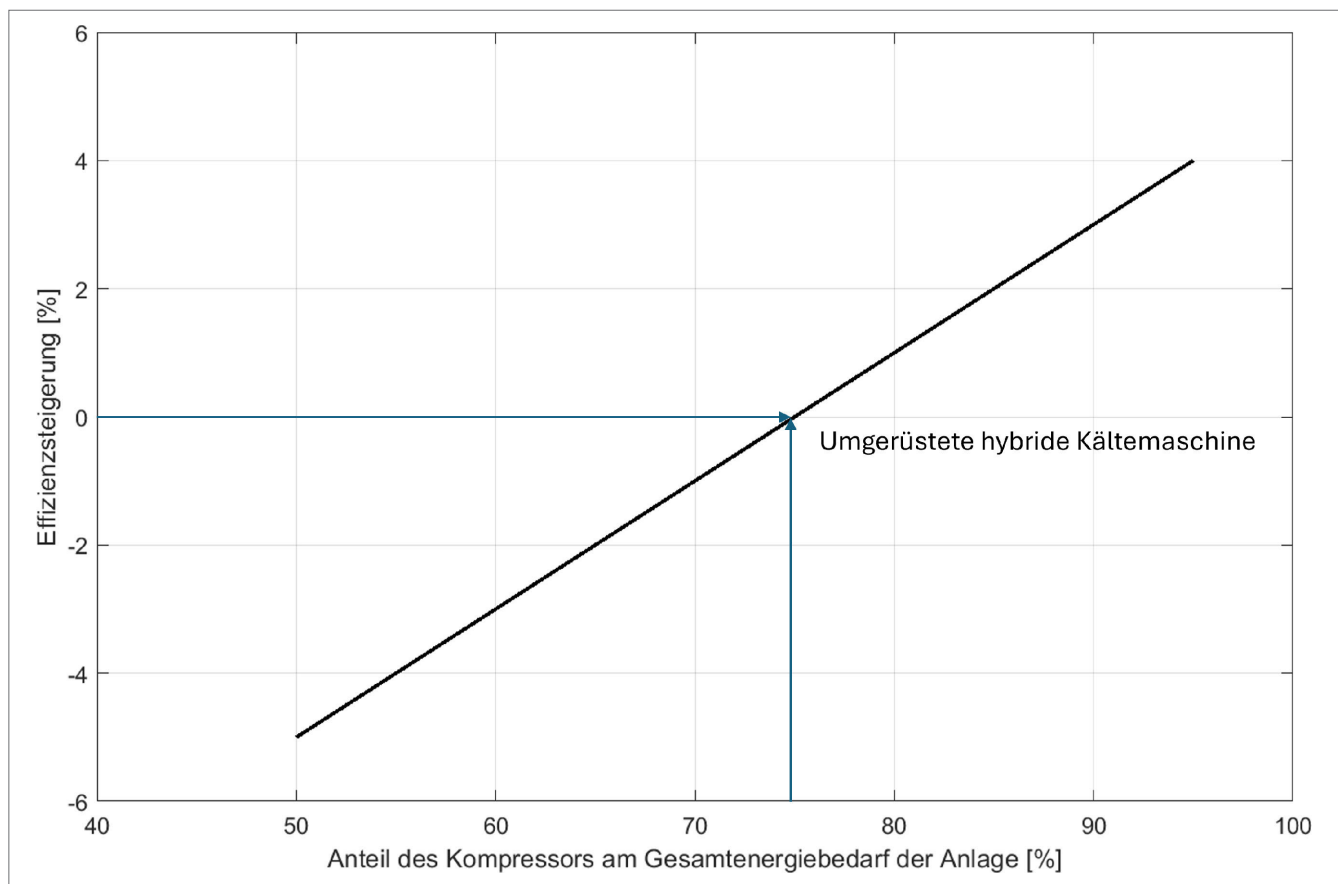
### 3 Einordnung der Ergebnisse zur Energieeffizienz der Kältemaschine

Da die hybride Kältemaschine sowohl kompressionsbetrieben als auch adsorptionsbetrieben Kälte bereitstellen kann, ist die hydraulische Verschaltung deutlich komplexer gegenüber einer konventionellen Kältemaschine. Es sind mehr Nebenverbraucher verbaut, die zu einem höheren Energiebedarf führen. Vor allem die Steuerung, die unregelmäßigen Pumpen und die Ventile haben bei dieser Kältemaschine denselben Energiebedarf, unabhängig vom Betriebspunkt oder Betriebsmodus.

Wie in Absatz 2.3 beschrieben, zeigen die Ergebnisse aufgrund des hohen Anteils der Nebenverbraucher am Energiebedarf der Kältemaschine keine erhebliche Effizienzänderung durch die Umrüstung von AC auf DC. Der Kompressor im Kältekreis hat jedoch durch die Umrüstung auf DC eine geringere Leistungsaufnahme und damit auch einen geringeren Energiebedarf als im AC-Betrieb. Der Einsatz des internen AC-Bus führt demzufolge zu einem negativen Einfluss auf den Energiebedarf der Nebenverbraucher. Die Effizienzsteigerung der gesamten Kältemaschine ist somit nicht konstant und davon abhängig, welchen Anteil die einzelnen Komponenten am Gesamtenergiebedarf ausmachen.

Die Abhängigkeit der Effizienzsteigerung vom Anteil des Kompressors am Gesamtenergiebedarf bei einer Umrüstung von AC auf DC ist konzeptionell in **Bild 3** dargestellt.

Wie in den Versuchen gemessen, ist die negative Effizienzveränderung durch die Umrüstung der Nebenverbraucher deutlich höher als die Effizienzsteigerung des Kompressors. Bei der im Projekt umgerüsteten Kältemaschine liegt der Anteil des Energiebedarfs des Kompressors bei etwa 75 % am Gesamtenergiebedarf der Kältemaschine, wodurch sich keine signifikante Steigerung der Gesamteffizienz einstellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei der umgerüsteten Maschine um eine Sonderanfertigung für den Laboraufbau handelt. In industriellen Anwendungen sind in der Regel Kältemaschinen mit höheren elektrischen Leistungen im Einsatz, wodurch typischerweise ein höherer Anteil des Kompressors am Gesamtenergiebedarf zu erwarten ist. Durch den höheren Anteil des Kompressors am Gesamtenergiebedarf kann allerdings eine Steigerung der Energieeffizienz der Kältemaschine erreicht werden. So ist bei einer elektrischen Leistungsaufteilung von 85 % Kompressor und 15 % Nebenverbraucher



**Bild 3** Effizienzsteigerung der Kältemaschine nach der Umrüstung auf DC in Abhängigkeit des Anteils des Kompressors am Gesamtenergiebedarf.  
Grafik: EEP Uni Stuttgart

cher in einem solchen Aufbau eine Effizienzsteigerung von etwa 3 % zu erwarten.

Eine weitere relevante Anmerkung betrifft die Betriebspunktabhängigkeit der Effizienzänderung. Da der Energiebedarf des Kompressors nicht in jedem Betriebspunkt konstant bleibt, der Energiebedarf der Nebenverbraucher aber größtenteils unabhängig vom Betriebspunkt ist, ist die zu erwartende Effizienzsteigerung nicht konstant, sondern abhängig von der Betriebsführung und Auslegung der Kältemaschine. Dieser Effekt ist bei einer reinen Kompressionskältemaschine nicht in diesem Umfang zu erwarten. Auch bei Kompressionskältemaschinen mit deutlich leistungsstärkeren Kompressoren ist der Anteil am Gesamtenergiebedarf höher.

#### 4 Ausblick

Mit der Umrüstung der hybriden Kältemaschine wurde ein weiterer Beitrag zur Allgemeingültigkeit der Methode zur Umrüstung von Bestandsmaschinen von Wechselstrom auf Gleichstrom nach [5] und [6] erbracht.

Bei der Umrüstung von Kältemaschinen beziehungsweise elektrisch betriebenen Kraftwärmemaschinen konnte nicht nur die Übertragbarkeit der Umrüstungsmethode bestätigt werden, sondern es zeigte sich auch, dass die Umrüstung auf Gleichstromversorgung Effizienzgewinne beim elektrischen Antrieb des Kompressors ermöglichen kann.

Insbesondere bei reinen Kompressionskältemaschinen ist eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz durch die Umrüstung

auf Gleichstrom zu erwarten, da der Anteil des Kompressors am Gesamtenergiebedarf deutlich höher liegt als bei der hier betrachteten Anlage.

Elektrisch betriebene Kraftwärmemaschinen sind auch Wärmepumpen, die im industriellen Maßstab durch die fortschreitende Elektrifizierung von thermischen Prozessen und industriellen Wärmenetzen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Aufbauend kann in einem zukünftigen Umrüstprozess einer Wärmepumpe in einem industriellen Maßstab die Methode angewendet werden.


#### FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes „DC-CoolTec“ (Förderkennzeichen: BW8\_1215) vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert.

#### Literatur

- [1] Kuhlmann, T.; Bianchini, I.; Sauer, A.: Resource and energy efficiency assessment of an industrial DC Smart Grid. *Procedia CIRP* 90 (2020), pp. 672–676
- [2] Sauer, A. (Hrsg.): Die Gleichstromfabrik. Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend. München: Hanser 2020

- [3] Kuhlmann, T.; Schaab, D. A.; Sauer, A.: Wie die Gleichstromfabrik real wird. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (2022) 1–2, S. 35–40
- [4] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik: System Description DC-INDUSTRIE. 2024. VDE SPEC 90037 V1.0 (en). Stand: 2024. Internet: [www.vde.com/resource/blob/2360634/86d934eebf76ee6f480565c94d4d319/vde-spec-90037-v1-0-en--data.pdf](http://www.vde.com/resource/blob/2360634/86d934eebf76ee6f480565c94d4d319/vde-spec-90037-v1-0-en--data.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [5] Knapp, J.; Righetti, P. D.; Schaab, D. A. et al.: Methodik zur Umrüstung von Produktionsmaschinen. Transformationsprozess von Produktionsmaschinen in einem industriellen Gleichstrommikronetz. wt Werkstattstechnik online 112 (2022) 3, S. 178–181. Düsseldorf: VDI Fachmedien, doi.org/10.37544/1436-4980-2022-03
- [6] Hölderle, D.; Knapp, J.; Sauer, A.: Methode für Analyse, Entwurf und Umrüstung von Maschinen. wt Werkstattstechnik online 113 (2023) 3, S. 129–133. Düsseldorf: VDI Fachmedien, doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-63

**Lucas Eduardo Marra de Lima**   
[lucas.marra-de-lima.2@eep.uni-stuttgart.de](mailto:lucas.marra-de-lima.2@eep.uni-stuttgart.de)


**Johannes Schwaiger**

**Isabella Bianchini M.Sc.**

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer** 

Universität Stuttgart  
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)  
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA   
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)