

LOW GWP Kälteversorgung im Tiefkühlbereich durch kombinierte Anwendung von Kompressions- und Adsorptionskältetechnik

Michael Dölz^{1*}, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlosser¹,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Schabbach²

¹ Hochschule Hof, Institut für Wasser- und Energietechnik, Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof,
mdoelz@hof-university.de, thomas.schlosser@hof-university.de

² Hochschule Nordhausen, Institut für Regenerative Energietechnik, Weinberghof, 99734 Nordhausen
thomas.schabbach@hs-nordhausen.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Die Kältebranche steht in den nächsten Jahren vor großen Herausforderungen. Auf der einen Seite müssen viele Kältemittel aufgrund der F-Gase-Verordnung in Zukunft substituiert werden. Andererseits steigt der Strombedarf für die Kältebereitstellung in Deutschland jährlich. Eine Möglichkeit der Energieeinsparung stellt der Einsatz von thermischen Kältemaschinen dar. Dieser Technologie sind auf Grundlage von Stoffeigenschaften der Kältemittel und wirtschaftlichen Betrachtungen Grenzen gesetzt. Der Leistungsbereich kleiner 200 kW wird heute aus Gründen der Wirtschaftlichkeit von Adsorptionskältemaschinen dominiert. Diese Kälteanlagen können aufgrund des Kältemittels Wasser nicht im Temperaturbereich kleiner 0 °C betrieben werden. Die Kooperation des Instituts für Wasser- und Energiemanagement (IWE) der Hochschule Hof und des Instituts für Regenerative Energietechnik (InRET) der Hochschule Nordhausen untersucht zur Effizienzsteigerung der Kälteversorgung im Tiefkühlbereich den Ansatz einer kombinierten Anwendung von Kompressions- und Adsorptionskältetechnik.

Auf der Grundlage von Messdaten und Herstellerangaben wurde in einer Voruntersuchung eine Studie ausgearbeitet, mit der die Effizienzsteigerung sowie die Wirtschaftlichkeit einer Verbundanlage nachgewiesen werden konnte. In der Studie wurden folgende Varianten untersucht:

1. Kaskadenschaltung aus Adsorptionskälte- und der Propankältemaschine. Die Verbesserung dieser Kombination gegenüber der Referenz ergibt sich in der Vorkühlung des Kühlwassers der Propankältemaschine und damit der Steigerung der Leistungszahl.
2. Einbindung der Adsorptionskältemaschine in den Kältekreislauf der Propankältemaschine. Mit Hilfe eines Wärmeübertragers wird das Kältemittel der Propankältemaschine nach dem Verflüssigen weiter unterkühlt. Aufgrund der tieferen Unterkühlung des Kältemittels, ist nach der Entspannung durch die Drossel der Dampfanteil geringer und es kann eine größere Kälteleistung gegenüber dem Referenzprozess realisiert werden.
3. Als Referenzanlage wird eine Nachbildung einer Propankältemaschine, die auf der Grundlage von Stoffdaten und Herstellerangaben erstellt wurde, verwendet.

In der Simulation wurde der EER (Energy Efficiency Ratio) und ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) der Referenzvariante (Variante 3) mit der Kaskadenschaltung (Variante 1) und der Einbindung in den Kältekreislauf (Variante 2) verglichen. Eine geringere Verbesserung des EER von 11 bis 16 % war bei der integrierten Variante zu beobachten. Bei der Kaskadenschaltung konnte die Kälteleistung dagegen zwischen 53 und 79 % gesteigert werden. Auf der Grundlage von Investitions- und Energiekosten zeigte die wirtschaftliche Betrachtung gegenüber der Referenzanlage eine mögliche Amortisationszeit von 6 bis 8 Jahren.

1 Einleitung

Die Kältebranche steht in den nächsten Jahren vor großen Herausforderungen. Auf der einen Seite müssen viele Kältemittel aufgrund der F-Gase-Verordnung in Zukunft substituiert werden. Andererseits steigt aufgrund der vermehrten Kältebereitstellung der Strombedarf für die Kälteanwendungen in Deutschland jährlich an. Für die Kältebereitstellung wurden in Deutschland im Jahr 2015 ca. 71 TWh elektrische Energie aufgewendet, dies entspricht rund 14 Prozent des Strombedarfs von Deutschland [1]. Fast ein Drittel des elektrischen Endenergiebedarfs 23,6 TWh wird im Bereich Supermarktkälte, Nahrungsmittelproduktion und Gewerbekälte verbraucht. Laut Reitze wird der Endenergiebedarf zur Prozesskälteerzeugung in den Bereichen des GHD-Sektors in der Periode von 2008 bis 2020 um 13% steigen [2]. Diese Entwicklung läuft den Zielen der Bundesregierung bezüglich einer fortschreitenden CO₂-Einsparung entgegen [3]. Weiterhin sind die Stromkosten im GHD-Sektor einer der größten Preistreiber und steigen durch diesen Trend weiter an.

Eine Möglichkeit der Reduktion des elektrischen Strombedarfs für die Kältebereitstellung stellt der Einsatz von thermischen Kältemaschinen dar. Thermische Kältemaschinen werden nicht durch Zufuhr elektrischer oder mechanischer Leistung angetrieben, sondern durch einen Heizwärmestrom und benötigen daher nur geringe Mengen an elektrischer Hilfsenergie. Der Vorteil thermischer Kältetechniken liegt aus betriebswirtschaftlicher Sicht in der Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs und damit der Betriebskosten für das Unternehmen. Dies gilt im Besonderen für den Fall, wenn in die thermische Energie im Unternehmen durch andere Prozesse als ungenutzte Abwärme vorliegt. Volkswirtschaftlich sind sie von großem Interesse, da durch die Verwendung thermischer Energie zum Antrieb elektrische Endenergie substituiert wird. Damit ist eine Einsparung fossiler Primärenergie und eine Reduzierung der energiebedingten CO₂-Emissionen verbunden.

Die am stärksten verbreiteten Bauarten thermischer Kältemaschinen sind Ab- und Adsorptionskältemaschinen. Der Sorptionstechnologie sind jedoch durch Stoffeigenschaften der Kältemittel und wirtschaftlichen Betrachtungen Grenzen gesetzt. Absorptionskältemaschinen werden vorrangig im Leistungsbereich größer 200 kW bis in den MW Bereich hinein eingesetzt. Bei geringeren Leistungsklassen steigen die spezifischen Technologiekosten überproportional stark an und können gegenüber anderen Konzepten nicht mehr ökonomisch dargestellt werden.

Der Leistungsbereich kleiner 200 kW wird durch die Adsorptionskältetechnik erschlossen. In Adsorptionsanlagen wird heute standardmäßig Wasser als Kältemittel verwendet. Wasser ist gegenüber anderen Kältemitteln vergleichsweise günstig, hat keine negativen Umwelteinflüsse und ist nicht gefährlich für den Menschen. Wasser hat jedoch den Nachteil, dass es bei Temperaturen unter 0 °C in den festen Aggregatzustand wechselt und der Adsorptionsprozess zum Erliegen kommt. Wird Wasser als Kältemittel verwendet kann der Temperaturbereich kleiner 0 °C nicht versorgt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, die Kältebereitstellung bei Temperaturen unter 0 °C und bei Leistungen kleiner 200 kW wird aktuell nicht im relevanten Maßstab durch thermische Kältemaschinen abgedeckt.

In einer Kooperation des Instituts für Wasser- und Energiemanagement (IWE) der Hochschule Hof und des Instituts für Regenerative Energietechnik (InRET) der Hochschule Nordhausen wurden in einer Voruntersuchung verschiedene Ansätze betrachtet, wie sich Adsorptionskältemaschinen im Tiefkühlbereich zur Effizienzsteigerung einsetzen lassen.

2 Hauptteil

Im ersten Abschnitt des Hauptteils werden zwei untersuchte Kombinationen von Adsorptions- und Kompressionskältetechnik vorgestellt. Hierzu werden die Verschaltungen skizziert und die thermodynamischen Überlegungen erläutert. Als Vergleichsanlage wird eine Propankältemaschine (PKM) herangezogen die ebenfalls im ersten Abschnitt eingeführt wird.

Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit den durchgeführten Simulationen. Zu Beginn wird die Datengrundlage, sowie die Verarbeitung dieser in der Software EES (Engineering Equation Solver) und Matlab vorgestellt. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Leistungsberechnung vorgestellt.

Abschließend werden im dritten Teil die Ergebnisse der Leistungsberechnung einer Kosten-Nutzen-Berechnung unterzogen, um eine wirtschaftliche Abschätzung der vorgestellten Varianten zu treffen.

2.1 Einführung der Referenzkältemaschine und der kombinierten Anlagen

Wie in der Einleitung bereits erläutert, lassen sich Adsorptionskältemaschinen mit dem Kältemittel Wasser nicht bei Temperaturen unter 0°C einsetzen. Es ist jedoch möglich thermische Kältemaschinen indirekt im negativen Temperaturbereich einzusetzen. So können sie mit mechanischen Kältemaschinen kombiniert werden, die im Tiefkühlbereich betrieben werden. Ziel dieser Kombination ist die Steigerung der Energieeffizienz der Gesamtanlage gegenüber der Standardausführung.

Die kombinierten Anlagen bestehen jeweils aus einer Propankältemaschine (PKM) und einer Adsorptionskältemaschine (ADKM). Die PKM wird durch einen Kompressionsverdichter angetrieben und ist eine markverfügbare Kältemaschine. Propan wurde als Kältemittel gewählt, da aufgrund der F-Gas Verordnung zu erwarten ist, dass diese Technologie zukünftig eine größere Verbreitung erfahren wird. Eine technische und wirtschaftliche Relevanz also gegeben ist. Weiterhin ist das Ziel der Untersuchung eine Kältemaschine zu entwickeln die einen geringes direktes und indirektes Global Warming Potential (GWP) aufweist. Mit einem GWP von 3 ist Propan in dieser Hinsicht perfekt geeignet den direkten Einfluss der Kältemaschine zu verringern [4]. Die Reduzierung des indirekten Global Warming Potential durch die Leistungsaufnahme des Verdichters, erfolgt mit Hilfe der thermischen Kältemaschine. Die Adsorptionskältemaschine wird mit dem Kältemittel Wasser betrieben und besitzt damit keinen direkten GWP. Der Verdichtungsvorgang erfolgt mit Wärme und benötigt keine elektrische Energie. Damit die Vergleichbarkeit zwischen Referenz- und kombinierter Anlage gewährleistet ist, wird als Referenz ebenfalls eine Propankältemaschine verwendet. Im Folgenden werden die einzelnen Varianten vorgestellt und ihre Wirkungsweise erläutert:

Variante 1 Kaskadenschaltung aus Adsorptions- und Propankältemaschine

Die erste untersuchte Verschaltung einer Propankältemaschine und einer Adsorptionskältemaschine ist die Reihen- oder Kaskadenschaltung. Diese ist schematisch in der Abbildung 1 dargestellt. Eine detaillierte Auflistung der dargestellten Bauteile mit Zuordnung der Messpunkte finden sie in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** im Anhang.

Im oberen Abschnitt der Abbildung ist die Adsorptionskältemaschine mit Generator, Verflüssiger, Drossel und Verdampfer zu sehen. Aus der Bilanzgrenze der ADKM (grün eingerahmter Bereich) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{Q}_{c\ ADKM} = \dot{Q}_{0\ ADKM} + \dot{Q}_{G\ ADKM} \quad (1)$$

Die über den Verflüssiger abgegebene Kühlleistung $\dot{Q}_{c\ ADKM}$ setzt sich aus der Summe über den Verdampfer aufgenommen Kälteleistung $\dot{Q}_{0\ ADKM}$ und über den Generator eingebrachter Antriebsleistung $\dot{Q}_{G\ ADKM}$ zusammen. Der externe Anschluss des Verdampfers der ADKM wird über Verbindung 31 und 32 mit dem externen Anschluss des Verflüssigers der Propankältemaschine verbunden. Das bedeutet die Kälteleistung der Adsorptionskältemaschine $\dot{Q}_{0\ ADKM}$ muss der Rückkühlleistung der PKM $\dot{Q}_{c\ PKM}$ entsprechen.

$$\dot{Q}_{0\ ADKM} = \dot{Q}_{c\ PKM} \quad (2)$$

Im unteren Abschnitt der Abbildung 1 ist blau der Bilanzbereich der Propankältemaschine zu sehen. Daraus wird ersichtlich, dass die abzuführende Rückkühlleistung der Propankältemaschine sich aus der zugeführten Verdichterleistung $P_{el\ PKM}$ und der Kälteleistung $\dot{Q}_{0\ PKM}$ zusammen setzt. Siehe dazu die folgende Gleichung

$$\dot{Q}_{c\ PKM} = \dot{Q}_{0\ PKM} + P_{el\ PKM} \quad (3)$$

Setzt man Gleichung 3 in Gleichung 2 ein ergibt sich mit Gleichung 4 ein wichtiger Zusammenhang dieser Variante. Die Kälteleistung der ADKM muss gleich der Summe aus Kälteleistung und Verdichterleistung der PKM sein.

$$\dot{Q}_{0\ ADKM} = \dot{Q}_{0\ PKM} + P_{el\ PKM} \quad (4)$$

Das bedeutet im Umkehrschluss die Kälteleistung der Propankältemaschine kann nie größer sein als die Kälteleistung der ADKM. Die in Gleichung 1 bis 4 aufgeführten Variablen sind keineswegs statisch, sondern verändern sich in Abhängigkeit der Temperaturen die am Verdampfer und Verflüssiger der

jeweiligen Kältemaschine auftreten. Damit ergeben sich für die Kaskadenschaltung die folgenden drei Einflussparameter:

- $T_{0\text{PKM}}$ Austrittstemperatur des Verdampfers der Propankältemaschine.
- $T_{\ddot{u}} = T_{0\text{ADKM}} = T_{c\text{PKM}}$ Die Übergabetemperatur $T_{\ddot{u}}$ entspricht der Austrittstemperatur des Verdampfers der Adsorptionskältemaschine und der Eintrittstemperatur des Verflüssigers der PKM
- $T_{c\text{ADKM}}$ Eintrittstemperatur des Verflüssigers der Adsorptionskältemaschine

Wie sich diese 3 Parameter auf die Gesamtanlage auswirken und optimiert werden können, soll im Abschnitt 2.2 bei der Vorstellung der Simulation näher erläutert werden.

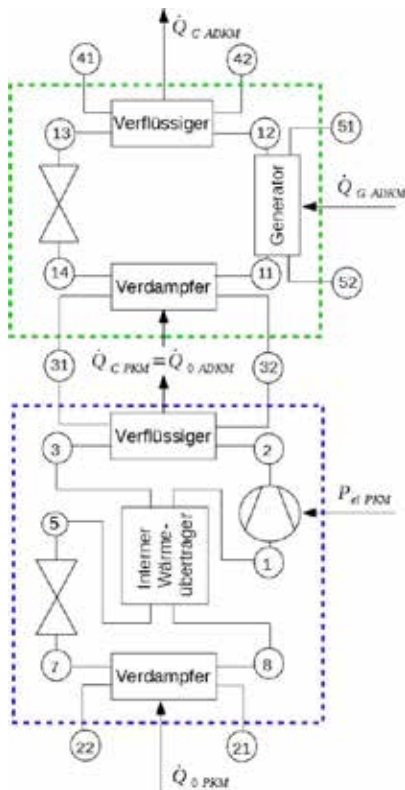


Abbildung 1 Schema der Kaskadenschaltung aus Adsorptions- und Propankältemaschine.

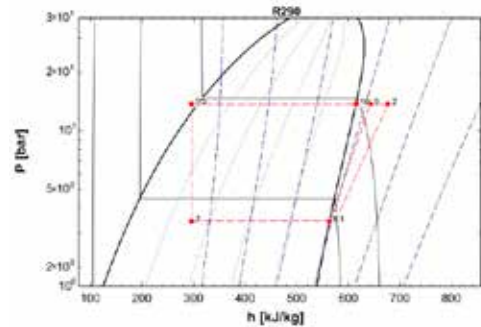


Abbildung 2 Log p-h Diagramm der Propankältemaschine bei der Referenzanwendung

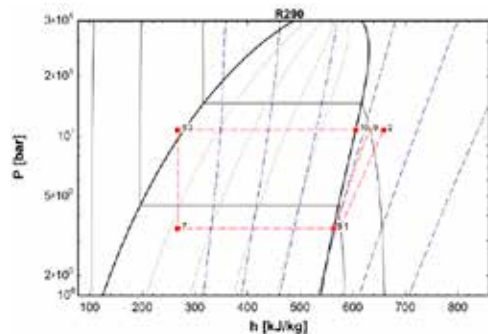


Abbildung 3 Log p-h Diagramm der Propankältemaschine bei kombinierten Betrieb

Die Effizienzsteigerung der Kaskadenschaltung gegenüber der Referenzanlage ergibt sich aus der unterschiedlichen Verflüssigertemperatur der PKM $T_{c\text{PKM}}$. Diese wird bei der kombinierten Anlage durch die Adsorptionskältemaschine verringert. Das Log p-h Diagramm in der Abbildung 2 zeigt den Kältemittelkreis der Referenzanlage und die Abbildung 3 den Kältemittelkreis der PKM in der Kaskadenschaltung. Im Vergleich zu Abbildung 2 kann in Abbildung 3 der benötigte Verflüssigerdruck gesenkt werden, was zu einer geringeren Verdichterleistung führt (Punkt 1 zu 2). Gleichzeitig ist nach der Entspannung durch die Drossel von Punkt 5 zu 7 der Dampfanteil im Kältemittel geringer. Dieser Umstand führt zu einer Vergrößerung der Kälteleistung (Punkt 7 zu 8). Zusammengefasst ergibt sich für diese Variante eine Reduzierung der benötigten elektrischen Leistung bei gleichzeitiger Vergrößerung der Kälteleistung. Weiterhin ist ein Vorteil dieser Verschaltung die relativ einfache Verbindung der ADKM mit der Propankältemaschine.

Variante 2 Einbindung der Adsorptionskältemaschine in den Kältekreislauf der Propankältemaschine

Bei der zweiten untersuchten Variante wurde die Adsorptionskältemaschine genutzt, um eine externe Unterkühlung des Kältemittels der Propankältemaschine herbeizuführen. Eine schematische Darstellung der Anlage ist in der Abbildung 4 zu sehen. Für die externe Unterkühlung wurde ein weiterer Wärmeübertrager, der sogenannte Unterkühler (Punkt 4 zu 5), in den internen Kältemittelkreislauf der Propankältemaschine eingebracht. Er ist dem internen Wärmeübertrager nachgeschaltet und befindet sich vor der Drossel. Mit Hilfe des Unterkühlers kann dem Kältemittel der Propankältemaschine zusätzlich Wärme entzogen werden und weiter unterkühlt werden. Die Bilanz der Propankältemaschine ändert sich im Gegensatz zu Gleichung 3 folgendermaßen:

$$\dot{Q}_{C PKM} = \dot{Q}_{0 PKM} + P_{el PKM} - \dot{Q}_{U PKM} \tag{5}$$

Bei der Variante 2 muss die Adsorptionskältemaschine nur die Kälteleistung die für den Unterkühler $\dot{Q}_{U PKM}$ benötigt wird aufbringen. Das heißt:

$$\dot{Q}_{0 ADKM} = \dot{Q}_{U PKM} \tag{6}$$

Setzt man Gleichung 6 in Gleichung 5 ein, ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$\dot{Q}_{C PKM} = \dot{Q}_{0 PKM} + P_{el PKM} - \dot{Q}_{0 ADKM} \tag{7}$$

Aus der Gleichung 7 lässt sich ableiten, dass die Bilanz auch aufgeht, wenn die ADKM keine Kälteleistung liefert. Die Gleichung kann nicht für die allgemeine Schlussfolgerung herangezogen werden, dass durch die zusätzliche $\dot{Q}_{0 ADKM}$ die Rückkühleistung der Propankältemaschine $\dot{Q}_{C PKM}$ kleiner wird. Dies gilt nur, wenn der Massenstrom des Kältemittels beim Ansteigen der externen Unterkühlung kleiner wird. Bleibt der Massenstrom konstant wird durch die Steigerung der externen Unterkühlung, die Kälteleistung der Propankältemaschine im gleichen Maße größer.

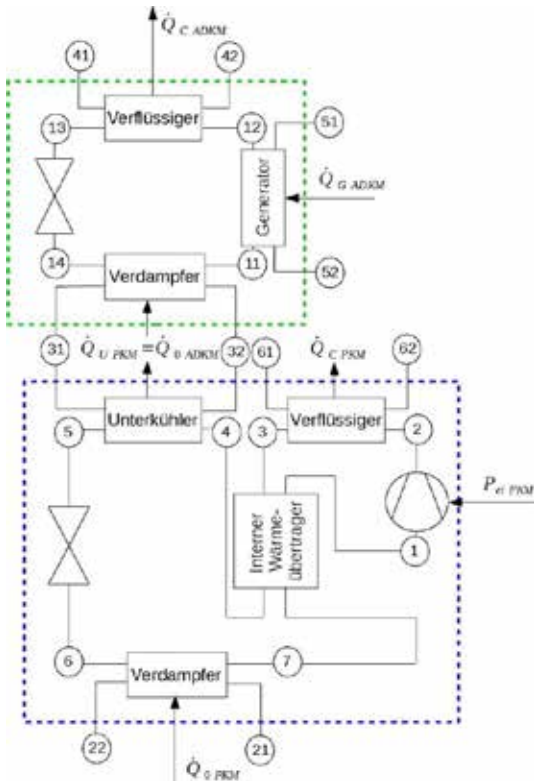


Abbildung 4 Schema der Einbindung der Adsorptionskältemaschine in den Kältekreislauf der Propankältemaschine

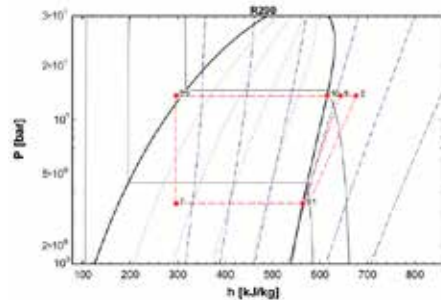


Abbildung 5 Log p-h Diagramm der Propankältemaschine bei der Referenzanwendung

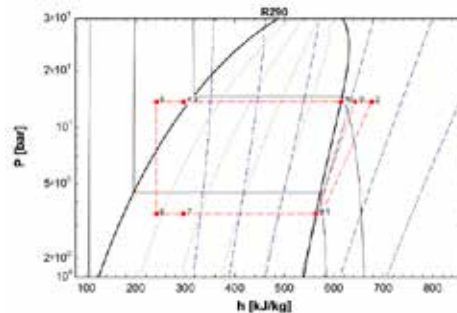


Abbildung 6 Log p-h Diagramm der Propankältemaschine mit externer Unterkühlung

Die Auswirkungen der externen Unterkühlung werden in der *Abbildung 5* und *Abbildung 6* deutlich. Die *Abbildung 5* zeigt die Referenzanlage im log p-h Diagramm. In der *Abbildung 6* ist eine externe Unterkühlung vom Punkt 4 zu 5 dargestellt. Der Massenstrom wurde bei der Betrachtung konstant gehalten. Aufgrund der tieferen Unterkühlung des Kältemittels, ist nach der Entspannung durch die Drossel der Dampfanteil des Kältemittels geringer und es kann eine größere Kälteleistung gegenüber dem Referenzprozess realisiert werden. Die zusätzliche Kälteleistung Punkt 6 zu 7 entspricht der Leistung die durch die externe Unterkühlung dem System entzogen wurde. Die benötigte Verdichterleistung und die Rückkühlleistung sind bei beiden Abbildungen dieselben. Zusammenfassend kann man sagen, da in den Kältekreislauf der Propankältemaschine eingegriffen werden muss, ist die Einbindung der thermischen Kältemaschine aufwendiger als eine Kaskadenschaltung. Der Vorteil ist, dass es keinen festen Zusammenhang zwischen der Kälteleistung der beiden Kältemaschinen gibt. Je weniger Kälte die Adsorptionskältemaschine bereitstellt, umso mehr verschiebt sich der Arbeitspunkt der Gesamtanlage in Richtung der Referenzanlage. Selbst wenn keine Abwärme zur Verfügung steht kann die Anlage noch Kälte liefern. Wird das Kältemittel durch ADKM extern unterkühlt kann die Effizienz der Anlage vergrößert werden.

2.2 Berechnung der Leistungszahlsteigerung

Auf der Grundlage von Maschinen- und Stoffdaten wurde vom Institut für Wasser und Energiemanagement (IWE) der Hochschule Hof in Zusammenarbeit mit dem Institut für Regenerative Energietechnik (InRET) der Hochschule Nordhausen eine Simulation erstellt, mit der die Effizienzsteigerung sowie die CO₂ Einsparung der Verbundanlagen gegenüber der Referenzanlage berechnet werden kann.

Mit Hilfe der Software Matlab und EES (Engineering Equation Solver) wurde ein Modell der Adsorptions- und der Propankältemaschine erstellt. Im Folgenden werden die einzelnen Modellierungsschritte für die beiden Modelle kurz erläutert.

Als Grundlage für das Modell der Propankältemaschine werden die Herstellerangaben über die Kälteleistung und el. Leistungsaufnahme bei definierten Betriebsbedingungen herangezogen. Diese Bedingungen beziehen sich auf die Verdampfer- und Verflüssigertemperatur sowie die Überhitzung und Unterkühlung des Kältemittels. Mit Hilfe der Software EES wird ein Kreisprozess mit dem Kältemittel Propan simuliert. Dieser ideale Kreisprozess wird anschließend weiter modelliert bis die Herstellerangaben mit den berechneten Werten übereinstimmen. Damit der Kreisprozess auch auf andere Betriebsbedingungen angewendet werden kann, bietet EES die Möglichkeit eine Parametervariation durchzuführen. Für die vorliegende Untersuchung wurden die folgenden Parameter variiert:

- Kälteleistung $\dot{Q}_{0\text{PKM}}$ im Bereich 5 bis 50 KW
- Eintrittstemperatur Verflüssiger T_C im Bereich 15 bis 35 °C
- externe Unterkühlung ΔT_{EX} im Bereich 0 bis 20 K
- Die Eintrittstemperatur am Verdampfer T_0 , die interne Unterkühlung und Überhitzung wurden nicht variiert.

Aus der Parametervariation wird ein Kennlinienfeld erstellt, dass sich aus den Variablen a bis i in Abhängigkeit der variierten Betriebsparameter berechnet. Die Gleichung 8 veranschaulicht den Zusammenhang. Sie setzt sich aus einem linearen (a bis c), einem quadratischen (d bis f) und dem Kreuzterm (g bis h) zusammen.

$$\begin{aligned}
 Y = & a \cdot \dot{Q}_{0\text{PKM}} + b \cdot T_C + c \cdot \Delta T_{EX} + \dots \\
 & + d \cdot \dot{Q}_{0\text{PKM}}^2 + e \cdot T_C^2 + f \cdot \Delta T_{EX}^2 + \dots \\
 & + g \cdot \dot{Q}_{0\text{PKM}} \cdot T_C + h \cdot \dot{Q}_{0\text{PKM}} \cdot \Delta T_{EX} + i \cdot T_C \cdot \Delta T_{EX}
 \end{aligned} \quad (8)$$

Mit der Gleichung 8 lassen sich anschließend die elektrische Leistungsaufnahme $P_{el\text{PKM}}$, die abzuführende Verflüssigerleistung $\dot{Q}_{C\text{PKM}}$ und die Leistung der externen Unterkühlung \dot{Q}_{EX} für beliebige Betriebsparameter bestimmen.

Die Erstellung des Kennlinienmodells der Adsorptionskältemaschine, ist im Vergleich zur Propankältemaschine, vereinfacht. Da für die Kälteleistung $\dot{Q}_{0\text{ADKM}}$, die Antriebsleistung $\dot{Q}_{G\text{ADKM}}$ und die Rückkühl-

leistung $\dot{Q}_{C\ ADKM}$ für verschiedene Betriebsparameter Messdaten vorlagen, musste kein thermisches Modell mit Hilfe von EES erstellt werden. Folgende Parametervariation liegt vor:

- Austrittstemperatur Verdampfer T_0 im Bereich 8 bis 17 °C
- Eintrittstemperatur Verflüssiger T_C im Bereich 25 bis 37 °C
- Eintrittstemperatur Generator T_G im Bereich 55 bis 90 °C

Aus den vorliegenden Messdaten wurde in Abhängigkeit der aufgeführten Parameter ein Kennlinienfeld für die 3 Leistungen erstellt. Die Kennlinienfelder bestehen wie die Gleichung 8 aus einem linearen, einem quadratischen und einen Kreuzterm. Zur besseren Veranschaulichung ist eine graphische Darstellung der Kälteleistung $\dot{Q}_{0\ ADKM}$ in Abhängigkeit der Kühltemperatur T_0 und der Rückkühltemperatur T_C bei 80 °C Antriebstemperatur T_G in der *Abbildung 7* dargestellt.

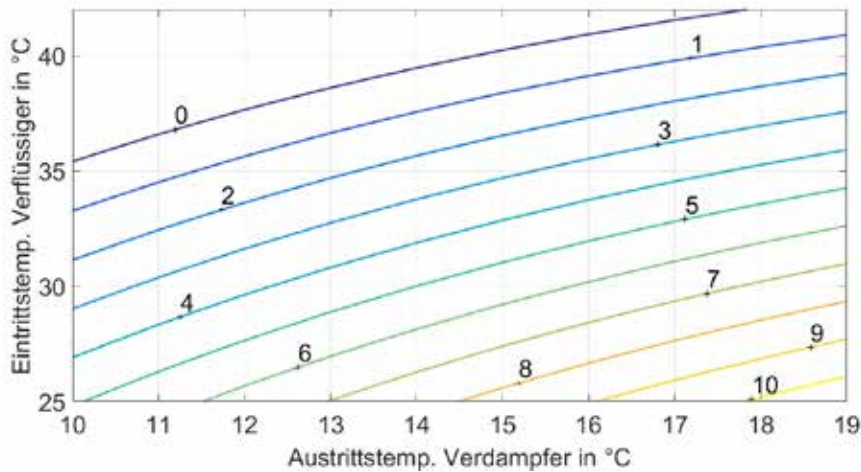


Abbildung 7 Kälteleistung der ADKM $\dot{Q}_{0\ ADKM}$ in Abhängigkeit der Kühl- T_0 und Rückkühltemperatur T_C bei 80 °C Antriebstemperatur T_G .

Aus der *Abbildung 7* wird deutlich, dass die Adsorptionskältemaschine bei erhöhten T_0 und reduzierten T_C die größte Kälteleistung aufweist. Die Eintrittstemperatur am Generator ist in der *Abbildung* konstant 80 °C. Wird diese verringert, verschieben sich die Leistungskennlinien in der *Darstellung* nach unten. Bei gleichen Temperaturen T_0 und T_C wurde das zu einer geringeren Kälteleistung der Anlage führen.

Der Vergleich der Referenzanlage und den beiden vorgestellten Varianten erfolgt anhand der Leistungszahl für Kältemaschinen den Energy Efficiency Ratio (EER). Dieser ist das Verhältnis von zugeführter el. Leistung zu der erbrachten Kälteleistung. Er berechnet sich für die kombinierten Anlagen wie folgt:

$$EER_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_0} = \frac{P_{el\ ADKM} + P_{el\ PKM}}{\dot{Q}_0\ PKM} \quad (9)$$

Für die Referenzanlage entfällt der Term für die elektrische Leistungsaufnahme der Adsorptionskältemaschine $P_{el\ ADKM}$. Die Gleichung 9 vereinfacht sich zu

$$EER_R = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_0} = \frac{P_{el\ PKM}}{\dot{Q}_0\ PKM} \quad (10)$$

Für die Berechnung der Leistungszahl der Referenz- sowie der kombinierten Anlagen werden folgende allgemeine Annahmen getroffen:

- Kühltemperatur $T_{0\ PKM} = 8\ ^\circ\text{C}$
- Antriebstemperatur $T_{G\ ADKM} = 80\ ^\circ\text{C}$
- Rückkühltemperaturen $T_C = 18; 22; 26; 30\ ^\circ\text{C}$

Die Kühltemperatur wurde mit -8 °C für eine Anwendung im Normalkühlbereich festgelegt. Die Antriebstemperatur von 80 °C wurde gewählt, weil hier die Kälteleistung der ADKM vorteilhaft ausfällt. Weiterhin sind 80 °C in der Nahrungsmittelindustrie ein häufig vorkommendes Temperaturniveau. An dieser Stelle sei nur das Herstellen von Backwaren erwähnt.

Kälteanlagen werden selten bei Auslegungsbedingungen und unter Vollast betrieben. Aus diesem Grund wird zusätzlich der European Seasonal Energy Efficiency Ratio (ESEER) mit den Vorgaben der Eurovent Certification Company herangezogen. Der ESEER dient der Berechnung der saisonalen Effizienz von Kältemaschinen im europäischen Raum. Dazu wird der EER bei den oben 4 definierten Rückkühltemperaturen ermittelt und in Abhängigkeit der Aufkommenswahrscheinlichkeit gewichtet. Dies soll den Wetterbedingungen in Europa entsprechen und einen optimalen Vergleich, bei den zu erwartenden Einsatzbedingungen ermöglichen. Die Tabelle 1 zeigt die Einsatzbedingungen und die Gewichtungsfaktoren.

Tabelle 1 Gewichtungsfaktoren und Rückkühltemperaturen zur Berechnung des ESEER

	T_c in $^{\circ}\text{C}$	Gewichtungsfaktor
EER_a	30	$a = 0,03$
EER_b	26	$b = 0,33$
EER_c	22	$c = 0,41$
EER_d	18	$d = 0,23$

Die Berechnung des ESEER erfolgt anschließend nach der Gleichung 11:

$$ESEER = EER_a \cdot a + EER_b \cdot b + EER_c \cdot c + EER_d \cdot d \quad (11)$$

Im ersten Schritt wird die Kaskadenanlage und die Referenzanlage betrachtet. Für die Berechnung wird ein zusätzlicher Parameter festgelegt:

- Kälteleistung der Propankältemaschine $Q_{0\text{ PKM}}$ 9 kW

Die Kälteleistung der Propankältemaschine $Q_{0\text{ PKM}}$ wurde mit 9 kW so gewählt, dass Gleichung 4 bei den vorgegebenen Antriebs- und Rückkühltemperaturen bei dem Einsatz einer ADKM erfüllt ist. Der Temperaturhub der Adsorptionskältemaschine $T_{C\text{ ADKM}} - T_{0\text{ ADKM}}$ wird vom Programm iterativ auf das Maximum ausgelegt. Die Tabelle 2 stellt den Temperaturhub sowie die el. Leistungsaufnahme der Propankältemaschine für die Referenz- und die kombinierte Anlage bei den verschiedenen Rückkühltemperaturen gegenüber.

Tabelle 2 Ergebnisse der Leistungsberechnung der Kaskadenschaltung

	Rückkühltemperaturen $T_{C\text{ ADKM}}$	Referenzanlage	Kaskadenschaltung
Temperaturhub $T_{C\text{ ADKM}} - T_{0\text{ ADKM}}$	18 $^{\circ}\text{C}$	0K	7,86 K
	22 $^{\circ}\text{C}$	0 K	8,62 K
	26 $^{\circ}\text{C}$	0 K	11,18 K
	30 $^{\circ}\text{C}$	0 K	15,30 K
El. Leistungsaufnahme $P_{el\text{ PKM}}$	18 $^{\circ}\text{C}$	2,286 kW	1,497 kW
	22 $^{\circ}\text{C}$	2,675 kW	1,556 kW
	26 $^{\circ}\text{C}$	3,111 kW	1,729 kW
	30 $^{\circ}\text{C}$	3,593 kW	2,049 kW

Für die Kaskadenschaltung kann man festhalten, dass der Temperaturhub der ADKM bei steigenden Rückkühltemperaturen sich vergrößert. Dieser Effekt ist mit dem abfallen der Kälteleistung der ADKM

$Q_{0\text{ADKM}}$ bei geringen Kühltemperaturen $T_{0\text{ADKM}}$ zu erklären. Vergleiche dazu auch die Abbildung 7. Die elektrische Leistungsaufnahme der Propankältemaschine ist bei der Kaskadenschaltung gegenüber der Referenzanlage verringert. Mit zunehmenden Rückkühltemperatur wird dieser Effekt weiter verstärkt. Der Vergleich des EER und des ESEER wird in der Abbildung 8 auf der Seite 9 dargestellt.

An dieser Stelle soll die 2. Variante, die externe Unterkühlung, mit der Referenzanlage verglichen werden. Die Allgemeine Parameter Kühltemperatur $T_{0\text{PKM}}$, Antriebstemperatur $T_{G\text{ADKM}}$ und die Rückkühltemperaturen T_C werden identisch wie bei der 1. Variante festgelegt.

Für die Simulation wurden weiterhin folgende weitere Annahme getroffen:

- Kälteleistung der Propankältemaschine $Q_{0\text{PKM}} 50\text{ kW}$

Die Vorgabe für die Festlegung der Kälteleistung der PKM ist, dass die Adsorptionskältemaschine einen Temperaturhub $T_{C\text{ADKM}} - T_{0\text{ADKM}}$ von mindestens 10 K aufweist. In der folgenden Tabelle 3 werden Ergebnisse der Leistungsberechnung gegenübergestellt.

Tabelle 3 Ergebnisse der Leistungsberechnung der externen Unterkühlung

	Rückkühltemperaturen $T_{C\text{ADKM}}$	Referenzanlage	Externe Unterkühlung
Temperaturhub $T_{C\text{ADKM}} - T_{0\text{ADKM}}$	18 °C	0K	11,5 K
	22 °C	0 K	15,0 K
	26 °C	0 K	17,3 K
	30 °C	0 K	17,8 K
El. Leistungsaufnahme $P_{el\text{PKM}}$	18 °C	11,61 KW	10,44 KW
	22 °C	13,31 KW	11,65 KW
	26 °C	15,05 KW	13,00 KW
	30 °C	16,85 KW	14,56 KW

Die in der Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse weisen die gleichen Tendenzen auf wie die Tabelle 2 der Variante 1. Die absoluten Werte der elektrischen Leistungsaufnahme der PKM sind im Gegensatz zu der Variante 1 aufgrund der größeren Anlage erhöht. In der Abbildung 8 sind die nach Gleichung 9 und 10 berechneten Werte des EER für die verschiedenen Rückkühltemperaturen gegenübergestellt. Weiterhin ist der nach der Gleichung 11 berechnete ESEER zu sehen.

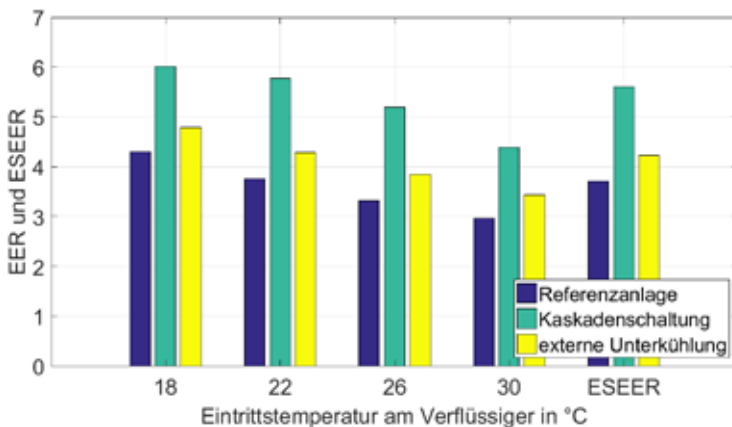


Abbildung 8 Vergleich EER und ESEER der Referenzanlage mit der Kaskadenschaltung und der externen Unterkühlung

Die Abbildung 8 macht deutlich, dass beide Varianten gegenüber der Referenzanlage zu einer Verbesserung der Leistungszahl führen. Bei der Kaskadenschaltung konnte die Leistungszahl zwischen 53 und 79 %, gegenüber der Referenzanlage, gesteigert werden. Der ESEER vergrößert sich um 69 % auf 5,6. Mit der Einbindung der Adsorptionskältemaschine zur externen Unterkühlung konnte eine Verbesserung des EER von 11 bis 16 % erreicht werden. Für die Berechnung des ESEER ergibt sich eine Steigerung um 14 % auf 4,2. Die folgende Tabelle 4 führt die eine Übersicht der berechneten Leistungszahlen der Varianten auf.

Tabelle 4 Gegenüberstellung der berechneten Leistungszahlen

	T_c 18 °C	T_c 22 °C	T_c 26 °C	T_c 30 °C	ESEER
Referenzanlage	4,31	3,76	3,32	2,97	3,71
Kaskadenschaltung	6,01	5,78	5,20	4,39	5,60
Externe Unterkühlung	4,79	4,29	3,84	3,43	4,23

2.3 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

In diesem Abschnitt soll abschließend die Wirtschaftlichkeit der Kaskadenschaltung und der externen Unterkühlung gegenüber der Referenzanlage untersucht werden. Dazu werden die im Abschnitt 2.2 gezeigten Verbesserungen mit Kosten für die elektrische Energie hinterlegt und den zusätzlichen Investitionskosten gegenübergestellt. Die Investitionskosten werden anhand vorliegender Angebote für die Kältemaschinen ermittelt, wobei noch keine möglichen Einsparungseffekte einer kombinierten Fertigung berücksichtigt wurden. Die Energiekosten wurden auf einem KMU üblichen Preisniveau angesetzt. Die Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse sind in der folgenden Tabelle 5 aufgelistet.

Die höheren Investitionskosten der Variante 2 ergeben sich durch die größere Propankältemaschine die bei dieser Variante eingesetzt wird. Der Zinssatz entspricht dem aktuell üblichen geringen Zinsniveau und die Preissteigerung von 3 % ist eine geringe Annahme. In den Branchen der Supermarktkälte, Nahrungsmittelproduktion und Gewerbekälte wird ganzjährig Kälteleistung benötigt, in diesen Bereichen ist eine Laufzeit von 8000 h/a zu erwarten.

Tabelle 5 Datengrundlage für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Zusätzliche Investitionskosten	12.000 €
Zinssatz	2 %
Stromkosten	0,16 €/kWh
Preissteigerung	3 %
Laufzeit	8.000 h/a

Für die Simulationen wird die Annahme getroffen, dass die Antriebswärme für die Adsorptionskältemaschine als Abwärme vorliegt, nicht anderweitig genutzt wird und kostenlos zur Verfügung steht. Weiterhin ist es vom Peripheriesystem abhängig, ob die Rückkühlenergie der Kälteanlage genutzt werden kann oder über Rückkühler, und damit mit zusätzlicher Hilfsenergie, an die Umgebung abgegeben werden muss. Aus diesen Grund wurde in der Untersuchung keine Kosten für die Rückkühlung bilanziert.

Die Einsparungen der Kaskadenschaltung gegenüber der Referenzanlage aus der reduzierten el. Leistungsaufnahme beträgt jährlich circa 1.347 €. Die Verbesserung des ESEER ist bei der Variante mit der externen Unterkühlung geringer als bei der Kaskadenschaltung, die Einsparungen pro Jahr fallen allerdings aufgrund der Anlagengröße mit 2.025 € höher aus. Die sich aus den zusätzlichen Investitionskosten gegenüber der Referenzanlage und den Einsparungen pro Jahr ergebende Amortisationszeit ist in der Tabelle 6 dargestellt. Die zusätzlichen Investitionskosten aus Tabelle 5 sind für beide Varianten

nahezu gleich und damit ergibt sich aus der größeren Einsparung pro Jahr eine geringere Amortisationszeit für die externe Unterkühlung als bei der Kaskadenschaltung. Mit 6 bzw. 8 Jahren könnte der Return of Investment (ROI) für kleine und mittelständige Unternehmen bereits von Interesse sein. Mit weiterer Forschungsarbeit können nach Meinung der Autoren zusätzliche Einsparungen bei den Investitionskosten aufgrund von Synergieeffekten erzielt werden. Eine Regelung die auf die kombinierte Anwendung angepasst ist, könnte die Einsparung von el. Leistung und damit die Reduzierung der laufenden Kosten weiter verstärken.

Tabelle 6 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung

	Kaskadenschaltung	Externe Unterkühlung
Einsparung pro Jahr	1374 €	2025 €
Amortisationszeit	8 a	6 a
CO ₂ Einsparung pro Jahr	4,07 ¹ t	6,00 ¹ t

Die CO₂-Einsparung gegenüber der Referenzvariante aufgrund der Reduzierung der benötigten elektrischen Energie beträgt bei der Kaskadenschaltung 4 t und bei der externen Unterkühlung 6 t. Auch in diesem Punkt ist die Kaskadenschaltung die bessere Variante.

3 Zusammenfassung

Damit es zu einer Reduktion der CO₂-Emission in einem wachsenden Kältemarkt kommen kann, sind alternative Technologien die Abwärme als Antrieb nutzen und natürliche Kältemittel verwenden in Zukunft unersetzlich.

Die vorgestellte Untersuchung zeigt das Potential einer kombinierten Anwendung von thermischer und mechanischer Kältebereitstellung. Die Kaskadenschaltung überzeugt durch eine einfache Einbindung und eine starke Verbesserung der Leistungszahl gegenüber einer Referenzanlage. Der Nachteil liegt in dem festen Leistungsverhältnis von Propan- zu Adsorptionskältemaschine, was im Endeffekt zu einer erhöhten Amortisationszeit führt. Die externe Unterkühlung kann ohne Beschränkung der Kälteleistung konfiguriert werden. Je geringer die Kälteleistung der ADKM, umso mehr gleicht sich der Prozess der Referenzanlage an. Auch wenn die Adsorptionskältemaschine ausfällt und keine Kälte bereitgestellt wird, funktioniert die Anlage weiter. Die Einsparung der elektrischen Energie pro Jahr und damit die Kostenersparnis sowie die CO₂-Vermeidung ist stärker als bei der Kaskadenschaltung. Die Einbindung ist aufgrund des Eingriffs in den Kältemittelkreis der Propankältemaschine komplizierter.

¹ Hochgerechnete Werte für das Jahr 2018 ergeben 474 Gramm pro Kilowattstunde elektrische Energie [5].

4 Nomenklatur

Formelzeichen		Indizes	
a	Gewichtungsfaktor (-)	ADKM	Adsorptionskältemaschine
b	Gewichtungsfaktor (-)	EX	Extern
c	Gewichtungsfaktor (-)	C	Verflüssiger
d	Gewichtungsfaktor (-)	G	Generator
EER	Energy Efficiency Ratio (W/W)	PKM	Propankältemaschine
ESE ER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio (W/W)	K	Kombination
P_{el}	Elektrische Antriebsleistung (W)	R	Referenz
\dot{Q}	Wärmestrom (W)	U	Umgebung
T	Temperatur (°C)	ü	Übergabe
ΔT	Temperaturdifferenz (K)	0	Verdampfer

5 Literaturverzeichnis

- [1] Guntram Preuß: Wirtschaftliche Entwicklung in der Kälte- und Wärmepumpentechnik. VDMA 2015
- [2] Reitze, Felix. Endenergiebedarf zur Prozesskälteerzeugung, Effizienzpotentiale, sowie hemmende Faktoren für den Einsatz von effizienter Kältetechnologie im GHD-Sektor und bei milchproduzierenden Betrieben in Deutschland in der Periode 2008 - 2020. Graz, Österreich: 13. Symposium Energieinnovationen, 2014.
- [3] Umweltbundesamt. Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2014.
- [4] Amtsblatt der Europäischen Union, VERORDNUNG (EU) Nr. 517/2014 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES, 16.April 2014
- [5] Umweltbundesamt: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018. Dessau-Roßlau März 2019