

Versuchsfeld Kühlzelle

Diana Stein, M.Sc. ; Michael Dölz, M.Eng.; Prof. Thomas Schlosser
Institut für Wasser- und Energiemanagement (IWE), Hochschule Hof, Hof

Abstract

Der jährliche Energiebedarf von 13 TWh in Europa allein für Einbaukältesätze legt nahe, dass hier ein großes Potential hinsichtlich Energieeffizienz ruht. An der Hochschule Hof wurde ein Versuchsfeld für die Prüfung von Luft-Luft-Kältesätzen aufgebaut. Der Aufbau und das Messprinzip wurden mit der Versuchseinrichtung eines führenden Instituts für Prüfungen von Kälteanlagen abgeglichen. Der Prüfaufbau kann den Anforderungen des Instituts standhalten. Die durchgeführten Versuche zur Kalibrierung des Kalorimeterraumes zeigen, dass absolute Umgebungstemperaturen bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenzelle keinen Einfluss auf die Bestimmung des Zellverlusts haben. Dies legt den Schluss nahe, dass absolute Temperaturen keinen Einfluss auf die Bestimmung des Zellverlusts haben.

1. Einleitung

Die Kältetechnik in Deutschland weist einen Elektroenergiebedarf von 71 TWh auf, Stand 2009. Das entspricht knapp 14 % des gesamten Strombedarfs Deutschlands. (VDMA, 2011) Laut Reitze wird der Endenergiebedarf zur Prozesskälteerzeugung im Bereich des Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektors (GHD-Sektors) in der Periode von 2008 bis 2020 um 13% steigen. Die Hälfte des Energiebedarfs fällt dabei auf die Subbranche Handel. (Reitze, 2014) Dort werden Kühlmöbel und Kühlzellen zur Lagerung verderblicher Produkte verwendet. Das ILK Dresden sichtet die veröffentlichten Daten aus verschiedenen Studien für den Energiebedarf installierter Einbaukältesätze. Anhand der Datenlage wird der Energiebedarf der Einbaukältesätze in Deutschland auf 500 GWh/a geschätzt. Für Europa wird ein geschätzter Energiebedarf von 13 TWh angegeben.

Prüfungen des ILK Dresden ergaben zudem, dass Kältesätze im Betrieb zum Teil erhebliche Abweichungen ihrer elektrischen Leistungsaufnahme entgegen den Angaben ihres Leistungsdatenblattes aufweisen. Die Abweichungen divergieren je nach Hersteller und Aggregat zwischen 0 % und 72 %. Als Ursache führt das ILK an, dass es keine Norm zur Prüfung von Kältesätzen gibt, so wie vergleichsweise bei Wärmepumpen. (ILK Dresden, 2017) Jeder Hersteller misst also nach eigenen Prüfbedingungen. Die angegebenen Leistungsdaten können nicht nachvollzogen werden.

Angesichts der nationalen Klimaschutzziele sieht das Umweltbundesamt Handlungsbedarf im Bereich der Kältetechnik (Umweltbundesamt, 2014). Standardisierte Prüfverfahren, eine Steigerung der Energieeffizienz der Kühlräume, sowie eine Änderung des Kühlraumdesigns können hier Lösungen sein.

An der Hochschule Hof werden Kältesätze geprüft, die ihren Einsatz vor allem in Kühlräumen der Lebensmittelindustrie finden. Hier wird an standardisierten Prüfverfahren für Kältesätze gearbeitet. Weiterhin soll ein Werkzeug entwickelt werden, mit dem das Anfahren der Prüftemperaturen automatisiert werden kann.

2. Thermodynamische Grundlagen der Kälteerzeugung

In Kältemaschinen werden zwei Prozesse verwendet, um einem externen Fluid Wärme zu entziehen. Der Erste ist die Wärmeleitung von einem Stoff mit höherer Temperatur zu einem Stoff mit geringerer Temperatur. Zweitens die Abhängigkeit der Siede- und Tautemperatur eines Fluides von dem Druck. Bei steigendem Druck vergrößert sich die Siede- sowie die Tautemperatur.

Der Kreisprozess wird als linksläufig bezeichnet und kann in offene und geschlossene Systeme unterteilt werden. Offene Systeme besitzen einen Stofftransport zwischen der Umgebung und dem Kältekreis und arbeiten vorwiegend diskontinuierlich. Nach jedem Arbeitsgang müssen sie regeneriert werden bevor sie wieder zur Verfügung stehen. Für die Versorgung eines Systems bei der ein stetiger Wärmeentzug benötigt wird eignen sich geschlossene Systeme besser. Bei diesen Systemen gibt es keinen Stofftransport, eine Regeneration ist aus diesem Grund nicht nötig. Das Fluid, das sich in dem Kreisprozess bewegt, bezeichnet man als Kältemittel. In Abhängigkeit der Einsatzbedingungen stehen verschiedene Kältemittel zur Verfügung. Im Fokus der Entwicklung steht die Anwendung natürlicher Kältemittel wie Propan, da diese ein geringeres Klimaerwärmungspotenzial als die Synthetischen aufweisen.

Kältemaschinen mit geschlossenem Kreisprozess bestehen grundlegend aus 4 Komponenten. Der Verdichter hebt den Druck des gasförmigen Kältemittels von dem unteren auf das obere Druckniveau. Aufgrund des erhöhten Drucks besitzt das Kältemittel jetzt eine höhere Tautemperatur, welche durch das anschließende Bauteil genutzt wird. Durch den Verflüssiger wird das Kältemittel und ein externes Fluid mit geringerem Temperaturniveau geleitet. Aufgrund der Temperaturdifferenz kommt es zur Wärmeleitung und dem Kältemittel wird Wärme entzogen bis es vollständig kondensiert ist. Im folgenden Schritt senkt die Drossel den Druck des flüssigen Kältemittels nahezu adiabat auf das untere Druckniveau ab. Mit dem Absinken des Drucks, ist die Siedetemperatur des Kältemittels ebenfalls gesunken. Im Verdampfer wird anschließend einem zweiten externen Fluid Wärme entzogen und dem Kältemittel zugeführt. Nach dem Verdampfer ist das Kältemittel gasförmig und wird wieder dem Verdichter zugeführt (Krug, 2010).

Zusätzlich zu den Grundkomponenten werden in Kältemaschinen oft weitere Bauteile verwendet, welche die Funktions- und Leistungsfähigkeit erhöhen. Es seien hier nur kurz der Interne Wärmeübertrager zur Wirkungsgradsteigerung und der Trockner zum Binden des Restwassers genannt (Krug, 2010).

Die Abb. 1 zeigt 2 Kreisprozesse in einem Log-p-h Diagramm. Das Diagramm stellt die physikalischen Eigenschaften des Kältemittels im Nassdampfgebiet sowie des flüssigen und gasförmigen Zustandes dar. Auf der y-Achse ist der Druck logarithmisch aufgetragen und auf der x-Achse wird die Enthalpie dargestellt. Zusätzlich können Temperaturen, die Sättigung des Nassdampfes, die Entropie und weitere Eigenschaften des Kältemittels dargestellt werden.

Möchte man einen Kreisprozess bei verschiedenen Einsatzbedingungen vergleichen, ist dieses Diagramm aufgrund der Darstellung der Enthalpie auf der x-Achse besonders geeignet. Geht man davon aus, dass der Massenstrom konstant ist kann man die Kälteleistung direkt anhand der Enthalpiedifferenz vergleichen. Gleiches gilt für die elektrische Leistungsaufnahme. Siehe dazu die Berechnung der Leistungen in den folgenden Gleichungen (1) und (2):

$$\dot{Q}_x = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot (h_{2x} - h_{1x}) \quad (1)$$

$$P_{elx} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot (h_{3x} - h_{2x}) \quad (2)$$

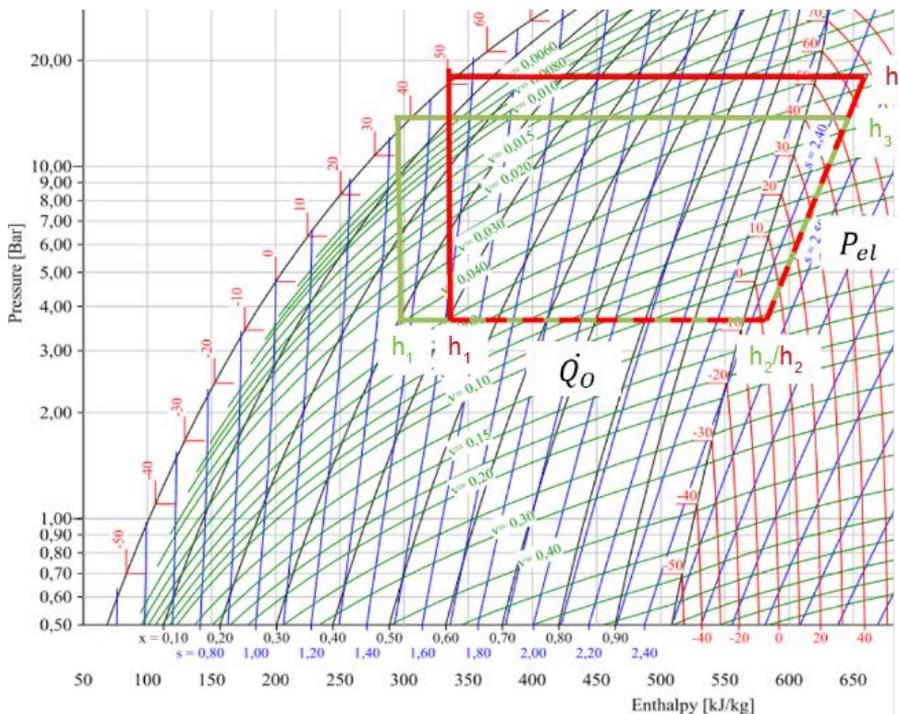


Abb. 1 Log-p-h Diagramm mit vereinfachter Darstellung eines Kreisprozesses bei unterschiedlichen Verflüssigertemperaturen

An der Abb. 1 ist die Auswirkung unterschiedlicher Umgebungstemperaturen auf die Leistungszahl des Kreisprozesses zu sehen. Die Leistungszahl von Kältemaschinen nennt man Energy Efficiency Ratio (EER). Wie in der Gleichung (3) dargestellt, stellt sie das Verhältnis von abgegebener Kälteleistung zu aufgenommener el. Leistung dar. Ein großer EER bedeutet, dass die Kältemaschine sehr effizient arbeitet.

$$EER = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (3)$$

In der Abb. 1 wird der gleiche Kreisprozess bei einer Verflüssigertemperatur von 40 °C (grün) und 50 °C (rot) betrieben. Bei der Erhöhung der Temperatur gibt es zwei Effekte die sich auf die Leistungszahl auswirken.

1. Die Enthalpiedifferenz zwischen h_2 und h_1 wird kleiner d.h. die Kälteleistung der Anlage sinkt.
2. Da das Kältemittel stärker verdichtet werden muss steigt die el. Leistungsaufnahme. Zu sehen ist das an der größeren Differenz zwischen h_3 und h_2 .

Das bedeutet für unseren Kreisprozess, dass bei höheren Verflüssigertemperaturen die Leistungszahl der Kältemaschine sinkt. Die gleichen Ergebnisse kann man beobachten, wenn bei gleichbleibender Verflüssiger- die Verdampfertemperatur sinkt. Allgemeiner kann man sagen: Wenn die Differenz zwischen Verdampfer- und Verflüssigertemperatur steigt wird die Leistungszahl kleiner.

3. Prüfstand für Luft-Luft Kältesätze der HS Hof am Standort Münchberg

Versuchsaufbau

Für Einbaukältesätze gibt es keinen verbindlichen Prüfstandard, so wie er für Raumklimageräte oder Wärmepumpen im Rahmen einer Norm existiert. Es wird geregelt welche Anforderungen bei der Gerätezeichnung gelten. Mangels verbindlicher Vorschriften für die Prüfmethode werden die Versuchseinrichtung und das Messverfahren mit dem Konzept des ILK Dresden zur Durchführung von Messungen an Einbaukältesätzen verglichen.

Beim Versuchsaufbau in Münchberg handelt es sich um einen Kühlraum, so wie er zur Kühlung und Lagerung von Lebensmitteln in Handel und Gewerbe eingesetzt wird. Dieser Kühlraum wird in dieser Arbeit weiterführend als Kalorimeterraum bezeichnet. Er ist in Abb.2 schematisch in der Frontansicht dargestellt. Der Prüfling ist so auf dem Kalorimeterraum montiert, dass sich der Verdampfer im Kalorimeterraum befindet und der Verflüssiger im Umgebungsraum. Der Kalorimeterraum besteht aus vier Seiten-, einem Decken- und einem Bodenelement aus Polyurethan Hartschaum mit einer Wandstärke von 100 mm. Er kann durch eine Schiebetür geöffnet und betreten werden. Im Kalorimeterraum befindet sich ein Heizaggregat, das definiert Wärme zuführt bis die gewünschte Temperatur erreicht wird. Um auch Umgebungsbedingungen zu simulieren, befindet sich der Kalorimeterraum in einem Umgebungsraum. Dieser besteht aus vier Seiten- und einem Deckenelement aus Polyurethan Hartschaum. Auf der Deckenplatte der Umgebungszelle befindet sich ein Kältesatz der den Umgebungsraum kühlt. Für eine verbesserte Durchmischung der Temperatur sind vier zusätzliche Ventilatoren verbaut. Mit der vorgestellten Versuchseinrichtung werden Einbaukältesätze getestet. Dies sind serienmäßig hergestellte Kälteaggregate um die Luft im Kühlraum mit Hilfe eines Kompressionskältekreislaufes abzukühlen. Für die Normkühlanwendung wird bei einer Temperatur von 0°C geprüft, für die Tiefkühlanwendung bei einer Temperatur von -20°C.

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten und um die Messunsicherheit zu verringern, werden am vorgestellten Messaufbau 20 Messfühler an unterschiedlichen Punkten angebracht. Die Aufnahme der elektrischen Leistung des Prüflings und des Heizgerätes wird mit zwei Universalmessgeräten realisiert. Die Messwertaufnahme und die Ansteuerung der Aktoren erfolgt mit Hilfe von drei separaten Hardwarekomponenten. Die Kommunikation zwischen PC und Hardware über Ethernet- und ModBus-Schnittstellen wird mit einem im Projekt entwickelten LabView-Programm umgesetzt.

Die in Kältesätzen verbauten Kältekreise können mit verschiedenen Kältemitteln betrieben werden, gängig sind R134a und R404A. Seit der F-Gas-Verordnung Nr. 517/2014 wird die Marktverfügbarkeit von HFKW-Kältemitteln kontinuierlich verringert. (Umweltbundesamt, 2015) Als Ersatzstoffe werden natürliche Kältemittel, wie CO₂, Ammoniak, Propan oder Propen verwendet, deren Global Warming Potential (GWP) niedrig ist. Im Gegensatz zu synthetischen weisen alternative Kältemittel oft eine erhöhte Brennbarkeit oder Toxizität auf. Für Versuche mit natürlichen Kältemitteln, die als brennbar eingestuft sind, ist der Prüfstand mit einer explosionsgeschützten Absaugvorrichtung ausgestattet. Bei einer erhöhten Konzentration an Kältemittel in der Luft wird dieses abgesaugt, womit die Gefahr einer Explosion ausgeschlossen werden kann.

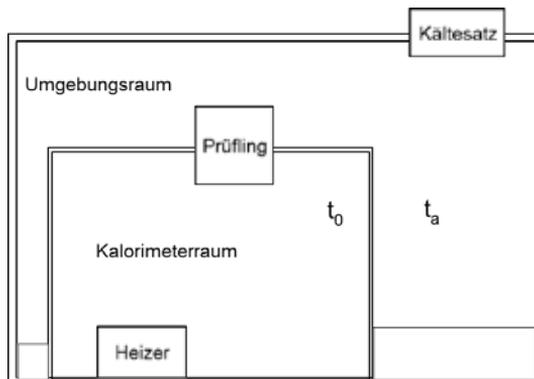


Abb.2 Schematische Vorderansicht des Versuchsaufbaus

Kalibrierung des Kalorimeterraumes

Vor der Messung der Kühlleistung wird der Wärmeeintrag über die Umschließungsflächen des Kalorimeterraumes gemessen. Der Faktor des Kalorimeterraumes wird ohne Betrieb des Prüflings ermittelt. Dieser Messwert wird als Korrekturfaktor für die Messung der Kühlleistung benötigt. In Abbildung 3 sind die Wärmeströme während der Messung des Wärmeeintrages zu sehen.

Laut ILK Dresden sollen vor Beginn der Leistungsmessung die Temperaturen des Umgebungsraumes und des Kalorimeterraumes umgekehrt werden. Demnach müssten bei Normalkühlung im Kalorimeterraum 32 °C und im Umgebungsraum 0 °C anliegen, bei Tiefkühlung 32 °C im Kalorimeterraum und -20 °C im Umgebungsraum. (ILK Dresden, 2017) Im vorgestellten Prüfaufbau ist dieses Vorgehen nicht möglich, da der Umgebungsraum über keinen isolierten Boden verfügt, vgl. Abb.2. Ziel der nachstehenden Versuche ist es daher zu zeigen, dass die absoluten Temperaturen für den Zellverlust über die Grenzen des Kalorimeterraumes nicht entscheidend sind.

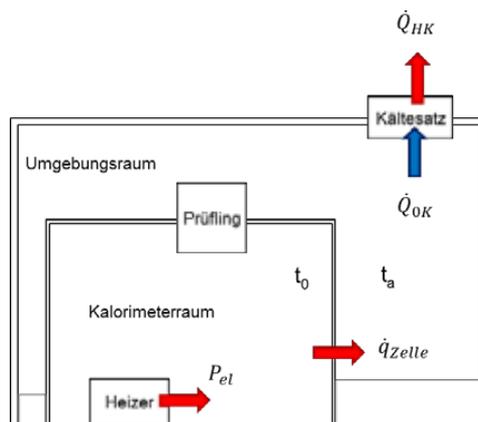


Abb.3 Messprinzip der Kalibrierung des Kalorimeterraumes

Der Kalorimeterfaktor wird bestimmt, indem an den Wand- und Deckenflächen eine Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenwand aufgebracht wird, die den Prüfbedingungen entspricht. Dazu wird der

Messaufbau unter festgesetzten Temperaturbedingungen in einen Gleichgewichtszustand versetzt. Dieser wird beim ILK 6 h gehalten um den Einfluss von Wärmeübertragungs- und Wärmespeicherprozessen zu minimieren. Diese treten aufgrund von Wärmekapazitäten in den Prüfräumen auf. Die maximale Abweichung der Temperaturen darf in diesem Zeitraum 1 K betragen. Dann befindet sich der Raum laut Definition im Gleichgewicht. Dieser Zustand wird über eine Gleichgewichtsperiode und die Messperiode konstant gehalten. In der Gleichgewichtsperiode schwingt sich das System noch ein. Das Gleichgewicht ist erreicht, wenn sich die Temperaturen im vorgegebenen Toleranzband von +/- 0,2 K befinden. (ILK Dresden, 2017)

Der Faktor des Kalorimeterraumes wird über Gleichung (4) bestimmt. Der spezifische Wärmeverlust errechnet sich aus der aufgewendeten elektrischen Leistung des Heizaggregates und der gemittelten Temperaturdifferenz zwischen Kalorimeterraum und Umgebungsraum.

$$\dot{q}_{zelle} = \frac{P_{elHeizer}}{t_0 - t_a} \quad (4)$$

Messprinzip der Kühlleistung

Die Kälteleistung eines Einbaukältesatzes wird vorrangig durch den eingebauten Verdichter und das verwendete Kältemittel bestimmt. Das ILK legt als wesentliche Kenngröße für Einbaukältesätze die Kühlleistung fest. Sie beschreibt die Wärmemenge, die der Luft im Kühlraum entzogen wird. Die Kühlleistung kann sowohl latente als auch sensible Wärmeübertragung enthalten. Dies hat zur Folge, dass der im Kühlraum befindliche Verdampfer und die darüber strömende Luft bedeutsam für die Übertragung der Kälteleistung an die Luft in der Kühlzelle sind. (ILK Dresden, 2017) Es reicht demnach nicht aus die Kälteleistung des Verdichters zu kennen. Die Übertragungsfläche und die Luftmenge müssen auf den Kältekreis abgestimmt werden.

Die Kühlleistung der Einbaukältesätze wird indirekt ermittelt. Dem kalibrierten Kalorimeterraum wird genau so viel elektrische Heizenergie zugeführt, dass sich ein Gleichgewicht zwischen Kühlleistung des Einbaukältesatzes und der zugeführten Heizleistung sowie dem Wärmeeintrag in die Kühlzelle durch deren Umschließungsflächen einstellt. Das Messprinzip der Kühlleistung ist in Abbildung 4 dargestellt.

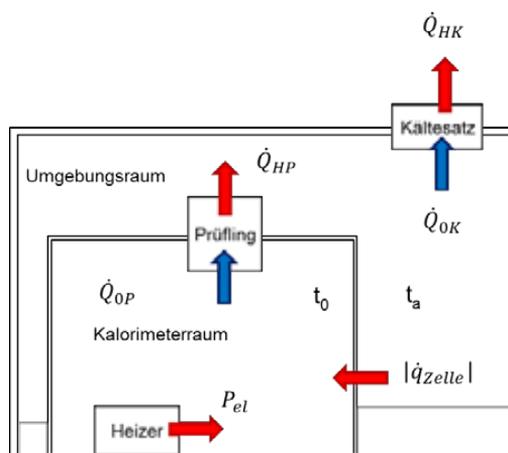


Abb. 4 Messprinzip der Kühlleistung

Die Ermittlung der Kühlleistung erfolgt analog zur Bestimmung des Kalorimeterfaktors mit dem Unterschied, dass der Einbaukältesatz in Betrieb ist. Für die Betrachtung müssen alle Bilanzräume im

Gleichgewichtszustand sein. Die Solltemperaturen für den Kalorimeterraum und den Umgebungsraum können nach Herstellerangaben festgelegt werden. In der vorliegenden Arbeit wird sich an den Solltemperaturen der Messungen des ILK orientiert um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erzielen zu können. Sie sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Solltemperaturen für die Prüfung der Kühlleistung von Kältesätzen

	Normalkühlung	Tiefkühlung
Kalorimeterraum	0°C	-20°C
Umgebungsraum	32°C	32°C

Die Kühlleistung ergibt sich aus dem Korrekturfaktor des Kalorimeterraumes, der Temperaturdifferenz zwischen dem Kalorimeter- und dem Umgebungsraum sowie der Heizleistung des Heizaggregates, vgl. dazu Gleichung (5).

$$\dot{Q}_0 = \dot{q}_{\text{Zelle}} \cdot (t_a - t_0) + P_{\text{elHeizer}} \tag{5}$$

4. Ergebnisse der Versuchsreihe: Bestimmung spezifischer Verlustwert bei unterschiedlichen absoluten Temperaturen

Im Zuge der Inbetriebnahme des Prüfstandes für Luft-Luft-Kältesätze am Standort Münchberg wurde eine umfassende Messung des spezifischen Verlustwärmestromes \dot{q}_{Zelle} durchgeführt. Dieser Faktor geht bei der Bewertung der Kältemaschinen direkt in die Berechnung der Kühlleistung ein. Aus diesem Grund ist eine genaue Bestimmung für die Güte der Leistungsmessung sehr wichtig. Folgende Fragestellungen sollen untersucht werden und mit den Empfehlungen des ILK Dresden abgeglichen werden:

1. Wie lange benötigt der Prüfstand bis er sich in einem Gleichgewichtszustand befindet?
2. Ist der spezifische Wärmeverluststrom bei gleicher Temperaturdifferenz abhängig von den absoluten Temperaturen?
3. Wie sind die Ergebnisse in Bezug auf die Messunsicherheit zu bewerten?

Zu Beginn wird der Gleichgewichtszustand betrachtet. Die Abb. 1 zeigt exemplarisch den Verlauf der Umgebungs- und der Kühltemperatur. Die Zieltemperaturen wurden mit 45 °C und 10 °C vorgegeben.

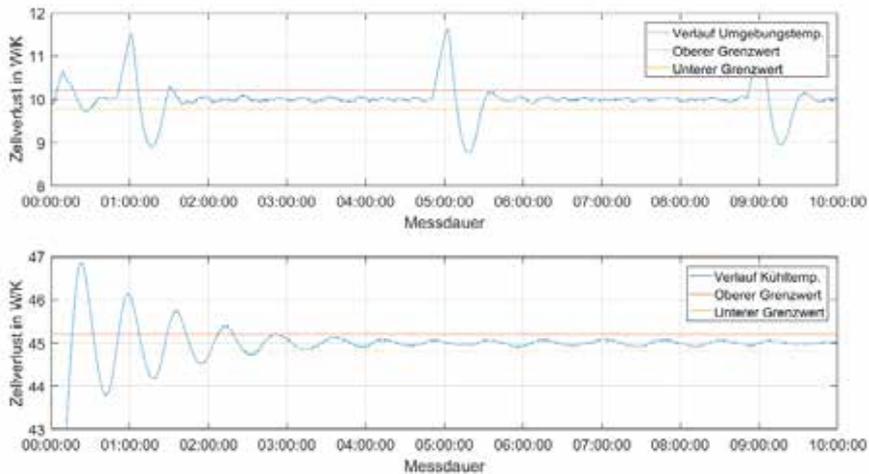


Abb. 5 Verlauf Umgebungs- und Kühltemperatur mit Grenzwert

Gut zu erkennen ist, dass die Umgebungstemperatur bereits nach zwei Stunden den Grenzwert von $\pm 0,2$ K einhält und um die Solltemperatur schwankt. Im Abstand von vier bis fünf Stunden wird der Verlauf gestört, da die Kühlung der Umgebung aufgrund der Abtauung des Deckenaggregates unterbrochen wird. Die Störung wirkt etwa eine Stunde nach bis die Temperatur anschließend wieder konstant verläuft. Die Temperatur im Kühlraum benötigt länger bis sie sich eingeschwungen hat. Nach vier Stunden wird auch hier der Grenzwert eingehalten. Um bestmögliche Ergebnisse zu erhalten wurden die Vorgaben des ILK noch weiter verschärft. Es wurde eine Einschwingdauer von 11 h gewählt und eine Prüfdauer von 1 h angesetzt in der ein Grenzwert von $\pm 0,1$ K nicht überschritten wurde.

In der Abb. 5 sind die spezifischen Verlustwerte für verschiedene Umgebungstemperaturen bei gleichen Temperaturdifferenzen dargestellt. Für die Darstellung der Messpunkte wurde der Boxplot gewählt, der folgende Informationen enthält. Die rote Markierung zeigt den Mittelwert aller Messpunkte einer Messreihe. Die äußeren Markierungen geben das Maximum und das Minimum an. Die Box um den Mittelwert grenzt den Bereich ein, in dem 50 % der Messwerte liegen. Gut zu erkennen ist, dass es keine klare Abhängigkeit zwischen der Umgebungstemperatur und den Messergebnissen gibt. Für die Erfassung des spezifischen Verlustwertes ist es somit unerheblich welche absoluten Temperaturen gewählt werden. Die Temperaturen für die Verlustmessung müssen demnach nicht zwingend auf $0/32$ °C bei Normalkühlung (Umgebungs-/Kalorimeterraum) bzw. bei Tiefkühlung $-20/32$ °C festgelegt werden.

Tabelle 2 Gegenüberstellung der Messfehler bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

	dT =15 K	dT =20 K	dT =25 K	dT =30 K	dT =35 K
Temperatur in K	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Leistungsmessung in % [0,5]	2,5	1,5	1,42	1,36	1,29
spez. Verlustwärmestrom in %	3,8	2,5	2,22	2,03	1,86
spez. Leistungsmessung in % [0,2s]	0,5	0,35	0,33	0,32	0,31
spez. Verlustwärmestrom in %	1,8	1,35	1,13	0,99	0,88

Der relative Fehler der Leistungsmessung wird bei steigendem ΔT kleiner. Dieser Effekt ist auf die eingesetzten Stromwandler zurückzuführen, die bei kleinen Strömen größere Ungenauigkeiten besitzen. Zu einem späteren Zeitpunkt sollen diese durch Stromwandler der Genauigkeitsklasse 0,2s ersetzt werden, die eine deutliche Steigerung der Genauigkeit zulassen. Die Messunsicherheit der Verlustwärmeströme wird mit zunehmender Temperaturspreizung zweifach positiv beeinflusst. Erstens wird der relative Fehler der elektrischen Leistungsmessung geringer, da sich ein größerer elektrischer Strom einstellt. Zweitens wird der Fehler der Temperatursensoren kleiner, da der absolute Fehler durch die Temperaturspreizung dividiert wird. Bei einem ΔT von 35 K liegt der relative Fehler mit den aktuellen Stromwandlern bei 1,86 %. Mit den besseren Stromwandlern sinkt der Fehler auf 0,88 % was einem guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand entspricht.

Aus der Abb. 5 ergibt sich bei einer Temperaturdifferenz von 35 K ein Mittelwert von 27 W/K. Mit einem Fehler von 2 % ergibt sich daraus eine Abweichung von +/-0,54 W/K bzw. ein Bereich von 26,46 bis 27,54 W/K. Die Ergebnisse aus der Abb. 5 liegen zum großen Teil in diesem Bereich. Die geringen Abweichungen der Messergebnisse können also auf die Messunsicherheit zurückgeführt werden und stellen keine Abhängigkeit dar.

5. Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die absoluten Umgebungstemperaturen bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenzelle keinen Einfluss auf die Bestimmung des Zellverlusts haben. Dies legt den Schluss nahe, dass absolute Temperaturen keinen Einfluss auf die Bestimmung des Zellverlusts haben. Für die Kalibrierung des Kalorimeterraumes ist eine große Temperaturdifferenz günstig, da die Messunsicherheit dann geringer ist.

Weitere Versuchsreihen sind geplant. So soll mit Hilfe des Versuchsaufbaus die Kühlleistung unterschiedlicher Kältesätze bestimmt werden. Auch eine Anleitung zur Ermittlung einer saisonalen Leistungszahl, wie ESSER, soll erarbeitet werden. Um eine gesamtheitliche Bewertung der Einbaukältesätze vornehmen zu können sind die Abtauhäufigkeit und deren Effizienz sowie die Höhe des Energieverbrauchs entscheidende Parameter. Diese sollen in folgenden Arbeiten untersucht werden.

Tabelle 2 Gegenüberstellung der Messfehler bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

	dT =15 K	dT =20 K	dT =25 K	dT =30 K	dT =35 K
Temperatur in K	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Leistungsmessung in % [0,5]	2,5	1,5	1,42	1,36	1,29
spez. Verlustwärmestrom in %	3,8	2,5	2,22	2,03	1,86

spez. Leistungsmessung in % [0,2s]	0,5	0,35	0,33	0,32	0,31
spez. Verlustwärmestrom in %	1,8	1,35	1,13	0,99	0,88

Der relative Fehler der Leistungsmessung wird bei steigendem ΔT kleiner. Dieser Effekt ist auf die eingesetzten Stromwandler zurückzuführen, die bei kleinen Strömen größere Ungenauigkeiten besitzen. Zu einem späteren Zeitpunkt sollen diese durch Stromwandler der Genauigkeitsklasse 0,2s ersetzt werden, die eine deutliche Steigerung der Genauigkeit zulassen. Die Messunsicherheit der Verlustwärmeströme wird mit zunehmender Temperaturspreizung zweifach positiv beeinflusst. Erstens wird der relative Fehler der elektrischen Leistungsmessung geringer, da sich ein größerer elektrischer Strom einstellt. Zweitens wird der Fehler der Temperatursensoren kleiner, da der absolute Fehler durch die Temperaturspreizung dividiert wird. Bei einem ΔT von 35 K liegt der relative Fehler mit den aktuellen Stromwandlern bei 1,86 %. Mit den besseren Stromwandlern sinkt der Fehler auf 0,88 % was einem guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand entspricht.

Aus der Abb. 5 ergibt sich bei einer Temperaturdifferenz von 35 K ein Mittelwert von 27 W/K. Mit einem Fehler von 2 % ergibt sich daraus eine Abweichung von +/-0,54 W/K bzw. ein Bereich von 26,46 bis 27,54 W/K. Die Ergebnisse aus der Abb. 5 liegen zum großen Teil in diesem Bereich. Die geringen Abweichungen der Messergebnisse können also auf die Messunsicherheit zurückgeführt werden und stellen keine Abhängigkeit dar.

5. Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die absoluten Umgebungstemperaturen bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenzelle keinen Einfluss auf die Bestimmung des Zellverlusts haben. Dies legt den Schluss nahe, dass absolute Temperaturen keinen Einfluss auf die Bestimmung des Zellverlusts haben. Für die Kalibrierung des Kalorimeterraumes ist eine große Temperaturdifferenz günstig, da die Messunsicherheit dann geringer ist.

Weitere Versuchsreihen sind geplant. So soll mit Hilfe des Versuchsaufbaus die Kühlleistung unterschiedlicher Kältesätze bestimmt werden. Auch eine Anleitung zur Ermittlung einer saisonalen Leistungszahl, wie ESSER, soll erarbeitet werden. Um eine gesamtheitliche Bewertung der Einbaukältesätze vornehmen zu können sind die Abtauhäufigkeit und deren Effizienz sowie die Höhe des Energieverbrauchs entscheidende Parameter. Diese sollen in folgenden Arbeiten untersucht werden.

6. Literaturverzeichnis

- ILK Dresden. (2017). *Untersuchungen an Einbaukältesätzen - Deckenkühlgeräte für Normal- und Tiefkühlager*. Heidelberg: KI Kälte Luft Klimatechnik.
- ILK Dresden. (12 2017). *Untersuchungen an Einbaukältesätzen - Deckenkühlgeräte für Normal- und Tiefkühlager. Kälte-Luft-Klimatechnik*, S. 40-49.
- Krug, N. H. (2010). *Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik*. Berlin: VDE Verlag.
- Reitze, F. (2014). *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.
- Umweltbundesamt. (2015). *Die neue F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014. Ihre Bedeutung für Betreiber, Planer und Hersteller*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Umweltbundesamt. (2014). *Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- VDMA. (2011). *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland – Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten*. Frankfurt am Main: VDMA.