

TOLERANZEN UND UNSICHERHEITEN VON LEISTUNGSDATEN FÜR KÄLTEMITTELVERDICHTER

JANUAR 2017



we make life better™



2111 Wilson Blvd, Suite 500
Arlington, Virginia 22201 USA
+001 (703) 524-8800

Herausgegeben von:



we make life better™

INHALTSVERZEICHNIS

ABSCHNITT	SEITE
Einleitung	1
Messunsicherheit	3
Unsicherheit bei der Reproduzierbarkeit von Prüfungen in verschiedenen Laboren	5
Fertigungsunsicherheit	6
Unsicherheit bei der Leistungsberechnung	8
Unsicherheit in Bezug auf den Unterschied zwischen Nenn- und Prüfbedingungen	9
Referenzen	11

EINLEITUNG

Die Normen für die Angabe von Leistungsdaten von Verdichtern und Verflüssigungssätzen gehen davon aus, dass die veröffentlichten Daten repräsentativ für den Durchschnitt der Produktion sind. Die gemäß den AHRI- und EN-Normen zulässige Toleranz wird bei Überarbeitungen regelmäßig neu geprüft. Diese Normen enthalten Beschreibungen der Nennbedingungen und der zugehörigen Toleranzwerte. Die Toleranzwerte in AHRI 510, AHRI 520, AHRI 540, AHRI 570, EN 12900 und EN 13215 variieren mit den Nennbedingungen und werden gemäß den aktuellen US-amerikanischen und europäischen Fertigungs- und Prüfnormenstandards für notwendig erachtet.

Nach EN 12900 beträgt die zulässige Toleranz für die Verdichterkälteleistung (im folgenden Kälteleistung):

- -5 % bei hoher Verdampfungstemperatur (High Back Pressure: HBP)
- -7,5 % bei mittlerer Verdampfungstemperatur (Medium Back Pressure: MBP)
- -10 % bei niedriger Verdampfungstemperatur (Low Back Pressure: LBP)

Für die Kälteleistungszahl des Verdichters (Coefficient of Performance, COP) oder den Energy Efficiency Ratio (Energy Efficiency Ratio, EER) sind Toleranzen bis zu -10 % zulässig, jedoch nur bis zu -5 % bei bestimmten Nennbedingungen.

Die oben genannten Normen geben eine einzige Toleranz für verschiedene Betriebsbedingungen und -bereiche an. Der Einfluss der Fertigungstoleranzen und der Messunsicherheit wird jedoch mit niedrigeren Verdampfungstemperaturen, d. h. mit einem höheren Druckverhältnis, größer. Prüfungen gemäß ASHRAE 23 oder EN 13771 stellen das Mittel dar, um die Leistungsdaten zu bestimmen und zu überprüfen. Die Unsicherheit des Überprüfungsverfahrens soll (gemäß der Methodik zur Qualitätssicherung) deutlich geringer sein als die einzuhaltende Toleranz.

In diesem Dokument werden fünf (5) Haupt-Unsicherheiten in Bezug auf die Verdichterleistung erörtert:

- Die Messunsicherheit basiert auf der Messabweichung der Messinstrumente, die für die Verdichterleistungsprüfung verwendet werden. Sie kann zu Unsicherheiten von bis zu 2,1 % der Kälteleistung und 1,3 % der Leistungsaufnahme führen, wenn Prüfungen in Übereinstimmung mit den Industrienormen ASHRAE 23 und EN 13771-1 durchgeführt werden. Zu diesen Unsicherheitswerten kommen noch zusätzliche systematische Unsicherheitsfaktoren wie Kältemitteldaten, Ölwurfrate, Messpunktabweichung und Stabilität der Betriebsbedingungen hinzu. Diese lassen sich jedoch nicht statistisch ermitteln.
- Die Unsicherheit der Reproduzierbarkeit von Prüfungen in verschiedenen Laboren basiert auf Unterschieden in Bezug auf die Messstellen, die Gerätekalibrierung, das Messverfahren, die Qualität des Stromnetzes und die Kältemittelleigenschaften. Diese können zu Unsicherheiten von bis zu 2,1 % der Kälteleistung und 2,3 % für die Kälteleistungszahl führen, wenn Prüfungen in Übereinstimmung mit den Industrienormen ASHRAE 23 und EN 13771 durchgeführt werden.
- Die Fertigungsunsicherheit entsteht für Hubkolbenverdichtern z. B. durch den Schadraum, Unterschiede in der maschinellen Bearbeitung von Teilen, den elektrischen Motorwirkungsgrad, interne Gasleckagen, Lagerausrichtungen und mechanische Verluste durch Reibungsflächen. Sie führt in der Regel zu einer Unsicherheit der Kälteleistung von 1,5 %.
- Die Unsicherheit der Leistungsberechnung ergibt sich durch die Inter- oder Extrapolation eines aus einer Regressionsanalyse gewonnenen Modells, welches aus einer begrenzten Anzahl an Messpunkten gewonnen wird. Die durchschnittliche Unsicherheit kann typischer Weise bis zu 4 % des Massenstroms bzw. 5 % der Leistungsaufnahme betragen. Die maximale Abweichung der Berechnung zum Meßwert kann bis zu 17 % für den Massenstrom bzw. 9 % für die Leistungsaufnahme betragen.
- Die Unsicherheit in Bezug auf den Unterschied zwischen Nenn- und Prüfbedingungen ergibt sich durch Prüfungen, die bei leicht von den Nennbedingungen abweichenden Bedingungen innerhalb der Grenzen der entsprechenden Norm durchgeführt werden. Sie kann zu

Abweichungen in der Größenordnung von 1,5 % des Massenstroms bzw. von 2 % der Leistungaufnahme führen.

Um Unsicherheitswerte zu erreichen, die wesentlich niedriger sind als die hier genannten Werte, müssten komplett neue Standardprüfverfahren sowie -aufbauten entwickelt werden, die sich sehr wahrscheinlich stark von realistischen Kälteanlagen unterscheiden würden.

MESSUNSICHERHEIT

Messunsicherheit in Prüfnormen

Prüfnormen für Verdichter und Verflüssigungssätze geben für Unsicherheiten Maximal- oder Grenzwerte an. Diese Werte sind Soll-Messunsicherheiten für einzelne Messgrößen. Die sich daraus ergebende Unsicherheit der Leistungsdaten kann auf Grundlage dessen in Form von Näherungswerten für die Kälteleistung von Verdichtern berechnet werden:

- $\pm 1,5$ % bei hoher Verdampfungstemperatur (HBP)
- $\pm 2,1$ % bei niedriger Verdampfungstemperatur (LBP)

Leistungsaufnahme: $\pm 1,3$ %

Die sich daraus ergebende Unsicherheit des COP beträgt somit ca.:

- ± 2 % bei hoher Verdampfungstemperatur (HBP)
- ± 3 % bei niedriger Verdampfungstemperatur (LBP)

Die Formulierungen in den Normen variieren, da sich nicht alle Normen vollständig an die technischen Regeln ISO/IEC Guide 98-3 (nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) – Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit) und ISO/IEC Guide 99 (nach VIM (Vocabulaire International de Métrologie) – Internationales Wörterbuch der Metrologie) halten.

Die Unsicherheiten in diesen Prüfnormen beziehen sich auf die Messgrößen, z. B. auf die Temperatur oder den Druck eines Mediums. Bei der angegebenen Unsicherheit handelt es sich um eine Kombination aus Unsicherheiten vom Typ A – basierend auf statistischen Analysen – sowie vom Typ B – basierend auf nicht statistischen Methoden. Typ B beinhaltet die systematischen Abweichungen oder Einflüsse der jeweiligen Messinstrumente und der Fühleranordnung.

Die Industrienormen ASHRAE 23 und EN 13771-1 handhaben die Unsicherheit genauso wie IEC-Normen, d. h. es wird eine erweiterte Messunsicherheit mit einem Vertrauensbereich von 95 % angegeben. Dies entspricht in etwa der zweifachen Standardabweichung, wenn nur Typ-A-Unsicherheitswerte inbegriffen sind.

Messunsicherheiten vom Typ A und B

Die Prüfnormen für Verdichter, ASHRAE 23 und EN 13771-1, sehen eine Kalibrierung der verwendeten Messinstrumente (Messkette) vor. Mit den während der Kalibrierung wiederholten Messungen lässt sich der statistische Anteil der Unsicherheit (Typ A) berechnen.

Der nicht statistische Anteil der Messunsicherheit (Typ B, systematisch) kann über die Abweichung des Durchschnittswerts vom Referenzwert während des Kalibrierverfahrens berechnet und somit korrigiert werden. Wenn die Größe und Richtung der Unsicherheiten vom Typ B nicht während der Kalibrierung bestimmt werden können, müssen sie genauso wie die Unsicherheiten vom Typ A gehandhabt werden.

Grenzwerte der Messunsicherheit

Die Prüfnormen ASHRAE 23 und EN 13771 listen maximal zulässige Unsicherheiten für die Messung notwendiger Messgrößen auf. Dabei gelten die folgenden wichtigen Werte:

- Temperatur $\pm 0,3$ K oder $\pm 0,5$ °F
- Temperaturdifferenzen ± 1 % der gemessenen Differenz
- Druck ± 1 % des Messwerts
- Elektrische Leistung ± 1 % des Messwerts

Die Kalibrierung muss gemäß nationale Normale oder Primärnormale rückführbar sein.

Unsicherheit vom Typ B, die auf anderen Einflussfaktoren basiert

Eine zusätzliche Messunsicherheit vom Typ B, die aufgrund der Abweichungen von idealen Prüfbedingungen entsteht, kann erkannt, jedoch nicht exakt bestimmt werden. Mögliche Einflüsse sind:

- Unsicherheit der Kältemitteldaten: Kältemitteldaten werden mithilfe einer Software auf Grundlage von Versuchsdaten berechnet. Sie können aus unterschiedlichen Quellen

stammen und daher variieren und im Laufe der Zeit verändert oder verbessert werden. Somit können die Daten, die zur ersten Prüfung verfügbar sind, von den Daten einer Wiederholungsprüfung leicht abweichen.

Der Einfluss auf die Leistungsdaten wird auf $< 1\%$ geschätzt.

- **Ölzirkulation im System:** Die meisten Verdrängerverdichter nutzen Öl als Schmiermittel und transportieren eine sehr geringe Menge davon mit dem Kältemittelmassenstrom. Der Einfluss lässt sich nur auf Grundlage von Erfahrungen schätzen oder aber durch technische Mittel (z. B. Ölabscheider) begrenzen. Die Auswirkungen des Öls hängen theoretisch vom aus der Prüfnorm ausgewählten Prüfverfahren, vom verwendeten Öl-Kältemittel-Gemisch und von den Betriebsbedingungen ab. Durch die Verwendung eines Ölabscheiders werden die Auswirkungen des Öls reduziert. Allerdings entsprechen die Betriebsbedingungen dann nicht mehr denjenigen von realistischen Systemen. Daher werden Ölabscheider nur für Ölwurfaten über $1,5\%$ gefordert.
Der verbleibende Ölgehalt kann die gemessenen Leistungsdaten geschätzt um bis zu 2% beeinflussen.
- **Von Sollwerten abweichende Bedingungen:** Während der Prüfungen können die stabilisierten Betriebsbedingungen leicht von den Sollwerten abweichen. Dieser Einfluss wird gesondert erörtert.
- **Stabilität der Betriebsbedingungen:** Zur Bestimmung der Kälteleistung mithilfe des Kältemittelmassenstroms wird angenommen, dass der Massenstrom an der Messstelle im System, z. B. einem Verdampferkalorimeter, während des Prüfzeitraums dem Massenstrom durch den Verdichter entspricht. Dies trifft zu, wenn alle Drücke, Temperaturen und andere Bedingungen vollkommen stabil sind. Da es sich dabei um eine ideale Situation handelt, treten geringe Abweichungen z. B. in der Wärmebilanz auf, die durch Wärmespeicherung oder –abgabe aufgrund der Wärmeträgheit der Masse entstehen. Diese Abweichungen lassen sich unter normalen Betriebsbedingungen nicht erfassen. Selbst in Prüfständen variieren die Bedingungen geringfügig, sodass sie diese Trägheitseinflüsse maskieren. Aus diesem Grund muss notwendigerweise mit Durchschnittswerten gearbeitet werden. Durchschnittswerte dienen nur als Näherung, da im Prozess nicht nur streng lineare Einflussfaktoren auftreten. In gut konzipierten Prüfständen sollten diese beiden Einflüsse relativ gering sein.

UNSICHERHEIT BEI DER REPRODUZIERBARKEIT VON PRÜFUNGEN IN VERSCHIEDENEN LABOREN

Die Reproduzierbarkeit von Prüfungen in verschiedenen Laboren bedeutet, dass eine Verdichterprüfung in einem anderen Labor wiederholt wird. Dabei wird das gleiche Produkt an den gleichen Betriebspunkten mit dem gleichen Kältemittel gemäß einer Messnorm wie EN 13771-1 geprüft.

Die Unsicherheiten in Bezug auf die Prüfungen in verschiedenen Laboren basieren auf Folgendem:

- zulässige Abweichungen von Druck, Temperatur, Drehzahl und Spannung
- Kalibrierung von Messgeräten
- Messverfahren, wie z. B. Volumen- oder Massenstrommessung auf der Saug- oder Druckseite
- Qualität des Stromnetzes
- Kältemiteleigenschaften oder Datenbank für Kältemiteleigenschaften

2012 hat ASERCOM ein umfangreiches Prüfprogramm zum Quantifizieren der Reproduzierbarkeit von Prüfungen in verschiedenen Laboren entwickelt. Die Labore von sieben verschiedenen europäischen Verdichterherstellern haben zusammen mit privaten, unabhängigen Laboren an diesem Prüfprogramm teilgenommen. Alle Labore wurden zuvor vom TÜV SÜD überprüft. In diesen Laboren wurden gemäß der EN 13771-1 verschiedene Parameter desselben Hubkolbenverdichters mit einem Durchfluss von etwa 100 m³/h an 14 verschiedenen Betriebspunkten gemessen. Die Messung erfolgte mit dem Kältemittel R404A und berücksichtigte Betriebspunkte mit mittleren und tiefen Verdampfungstemperaturen. In jedem Labor wurde die Kälteleistung und die Leistungsaufnahme des Verdichters gemessen.

Um die Ergebnisse auswerten zu können, wurde für jeden Betriebspunkt das arithmetische Mittel für die Kälteleistung und die Leistungsaufnahme berechnet. Dann wurde die Abweichung der einzelnen Messwerte vom arithmetischen Mittel bestimmt und eine Normalverteilung gezeichnet. Die maximale Abweichung für alle Werte innerhalb des Bereichs der zweifachen Standardabweichung wurde bestimmt. Die Ergebnisse lauteten wie folgt:

Tiefe Verdampfungstemperaturen

- Kälteleistung: $\pm 2,1$ %
- Leistungsaufnahme: $\pm 1,2$ %
- COP/EER: $\pm 2,3$ %

Mittlere Verdampfungstemperaturen

- Kälteleistung: $\pm 1,5$ %
- Leistungsaufnahme: $\pm 1,5$ %
- COP/EER: $\pm 1,8$ %

Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichung in Bezug auf die Kälteleistung bei einer niedrigen Verdampfungstemperatur größer ist. Aufgrund des geringeren Saugdrucks ist die Kälteleistung bei einer niedrigen Verdampfungstemperatur schwerer zu messen. Beim COP/EER wird deutlich, dass 95 % der Messwerte um 2,3 % oder weniger vom arithmetischen Mittel abweichen. Die maximale Abweichung zweier Labore bei einem einzigen Betriebspunkt betrug 6,5 %.

FERTIGUNGSUNSICHERHEIT

Schadraum

Bei den aufgeführten Toleranzen ist für den LBP-Betrieb (tiefe Verdampfungstemperatur) im Vergleich zum HBP-Betrieb (hohe Verdampfungstemperatur), insbesondere für die Kälteleistung, eine höhere Abweichung zulässig. Dies berücksichtigt das typische Verhalten von z. B. Hubkolbenverdichtern, die oft für Anwendungen mit niedrigen (LBP) und mittleren Verdampfungstemperaturen (MBP) eingesetzt werden. Hubkolbenverdichter weisen einen Schadraum auf, der notwendig ist, damit der Kolben nicht die Ventilplatte trifft. Der Schadraum kann 2 bis 3 % des Hubvolumens betragen und bei der Fertigung durch Fertigungstoleranzen der Kette Kolben – Verbindungsstange – Pleuellwelle – Gehäuse – Dichtung variieren.

Unter der Annahme, dass der Schadraum um $\pm 0,5$ Prozentpunkte variiert, zeigt eine Berechnung den Einfluss auf die Nutzung des Hubvolumens (auch Liefergrad genannt). Mit Nennbedingungen für Klima- und Tiefkühlanwendungen zeigt sich der ungefähre Einfluss eines zusätzlichen 0,5-%-Schadraums je nach verwendetem Kältemittel wie folgt:

- | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| • Bedingung AC/HBP Durchfluss | Druckverhältnis: 3 zu 4 | Einfluss: 1,5 bis 2 % |
| • Bedingung LBP Durchfluss | Druckverhältnis: 10 zu 15 | Einfluss: 5 bis 7,5 % |

Der Gütegrad des Verdichters verringert sich nicht erheblich, da sich das verdichtete Gas im Schadraum erneut ausdehnt und einen um die Verluste reduzierten Anteil der Kompressionsenergie zurückliefert. Die Reibungsverluste des Verdichters werden nicht beeinflusst. Somit wird der COP weniger stark verringert als die Kälteeistung.

Aus diesem Grund ist die COP-Toleranz bei allen Bedingungen die gleiche.

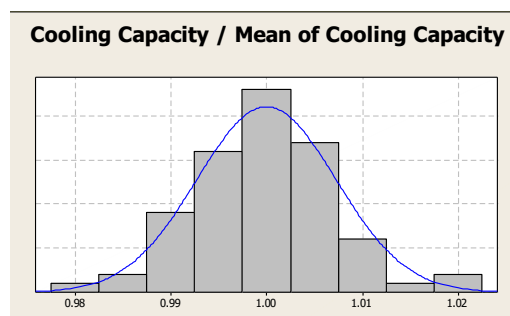
Produktvariation

Die Produktvariation entsteht durch eine Vielzahl von unabhängigen Faktoren, die jeweils innerhalb ihrer eigenen Fertigungs- und Montagetoleranzgrenzen variieren. Je nach Konstruktion und Technologie beeinflussen die bekannten Faktoren auf verschiedene Weise die Kälteleistung, die Motorleistung und den COP.

Dabei handelt es sich u. a. um folgende Faktoren:

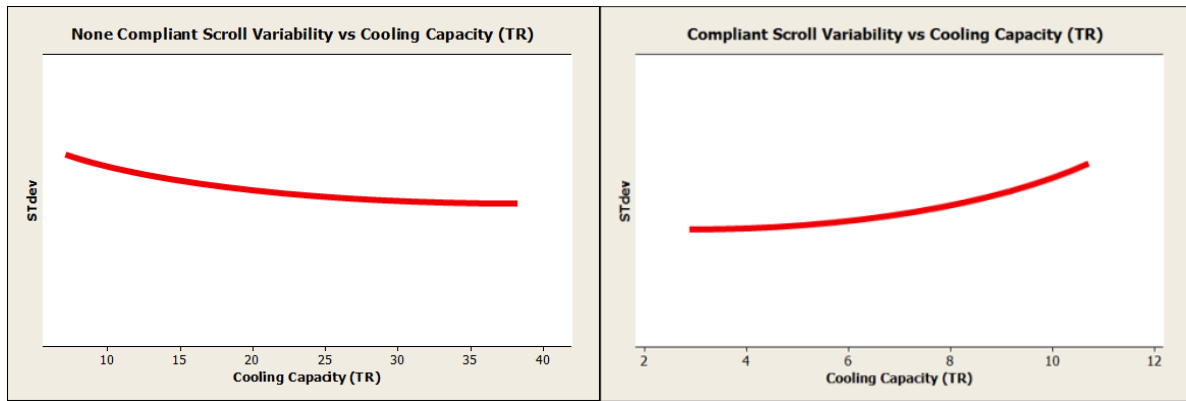
- Schadraum von Hubkolbenverdichtern im Verhältnis zum Temperaturbereich
- Variationen bei der maschinellen Bearbeitung von Teilen
- Elektrischer Motorwirkungsgrad
- Interne Gasleckagen (Ventile von Hubkolben- oder Spalte in Scrollverdichtern)
- Lagerausrichtungen
- Mechanische Verluste durch Reibungsflächen

Die typische Produktvariation bei der Kälteleistung beträgt wie unten gezeigt etwa $\pm 1,5$ % (2σ):



Der Variationsverlauf entsteht durch das Auftreten und das Gewicht der verschiedenen Faktoren je nach Konstruktion, der Technologie und dem Montageverfahren. Verändert sich die Größenordnung nicht erheblich, sagt die Form der Kennlinie etwas über das Verhalten und die Empfindlichkeit einer repräsentativen Verdichterreihe aus.

Die folgenden Kennlinien, die auf einem begrenzten Analyseumfang basieren, zeigen verschiedene konkrete Fälle.



UNSICHERHEIT BEI DER LEISTUNGSBERECHNUNG

Verdichterhersteller sind dazu verpflichtet, Verdichterleistungsdaten für bestimmte Betriebsbereiche anzugeben. Diese erforderlichen Angaben der Leistungsaufnahme, des Kältemittelmassenstroms und der Kälteleistung werden genutzt, um verschiedene Verdichter bei festgesetzten Betriebsbedingungen zu vergleichen sowie Systemsimulationen innerhalb des Betriebsbereichs durchzuführen.

Unsicherheiten bei den berechneten Daten dieser Angaben werden von Messunsicherheiten, Variationen zwischen den Verdichtern, dem verwendeten Polynom (Grundprinzip oder Black-Box-Modell), der Extrapolation und der Unsicherheit der Regression beeinflusst. Die Norm AHRI 540 legt ebenso wie die EN12900 insbesondere fest, dass für Verdichterbewertungen ein Polynom mit zehn Koeffizienten (wie in der folgenden Gleichung 1 dargestellt) verwendet werden muss:

$$X = C_1 + C_2(T_s) + C_3(T_d) + C_4(T_s^2) + C_5(T_s T_d) + C_6(T_d^2) + C_7(T_s^3) + C_8(T_s^2 T_d) + C_9(T_s T_d^2) + C_{10}(T_d^3)$$

Wobei gilt:

C1 bis C10 = Regressionskoeffizienten, bereitgestellt vom Hersteller

T_d = Taupunkttemperatur Druckseite, °F, °C

T_s = Taupunkttemperatur Saugseite, °F, °C

X = Leistungsmetrik (Kälteleistung, Leistungsaufnahme oder Massenstrom¹ und Leistungsaufnahme)

AHRI 540 gibt auch an, dass die Regressionskoeffizienten mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden sollten, wofür wie in der folgenden Gleichung 2 gezeigt mindestens elf Messpunkte erforderlich sind:

$$\begin{bmatrix} 1 & T_{s1} & T_{d1} & T_{s1}^2 & T_{s1}T_{d1} & T_{d1}^2 & T_{s1}^3 & T_{s1}^2T_{d1} & T_{s1}T_{d1}^2 & T_{d1}^3 \\ 1 & T_{s2} & T_{d2} & T_{s2}^2 & T_{s2}T_{d2} & T_{d2}^2 & T_{s2}^3 & T_{s2}^2T_{d2} & T_{s2}T_{d2}^2 & T_{d2}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{s11} & T_{d11} & T_{s11}^2 & T_{s11}T_{d11} & T_{d11}^2 & T_{s11}^3 & T_{s11}^2T_{d11} & T_{s11}T_{d11}^2 & T_{d11}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \\ C5 \\ C6 \\ C7 \\ C8 \\ C9 \\ C10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{11} \end{bmatrix}$$

Die Kennlinienanpassung basiert auf experimentellen Messwerten für Temperaturen, Massenströme und die Leistungsaufnahme. Aus diesem Grund haben die Messunsicherheiten wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben erhebliche Auswirkungen auf die Unsicherheit des Regressionsmodells. Aute und Martin [1] untersuchten die Unsicherheit der Regression für Gleichung 1 und zeigten, dass die durchschnittliche Unsicherheit bis zu 4 % beim Massenstrom und bis zu 5 % bei der Berechnung der Kälteleistung betragen kann. Die maximale absolute Abweichung kann bis zu 17 % beim Massenstrom und bis zu 9 % bei der Leistungsberechnung betragen. Die größten Abweichungen treten dabei bei Betriebsbedingungen mit niedrigen Taupunkttemperaturen auf der Saug- und Druckseite auf.

Es können zusätzliche Versuchsdatenpunkte verwendet werden, um die Genauigkeit der Vorhersage über den Betriebsbereich zu verbessern. Aufgrund der Kosten dieser zusätzlichen Versuche müssen Verdichterhersteller jedoch oftmals einen Kompromiss eingehen zwischen der Anzahl der Versuche und der Unsicherheit für die Berechnung. Die bei der linearen Regression zu verwendenden Messpunkte sollten sorgfältig ausgewählt werden. Adaptiv statistische Versuchsplanung wird empfohlen, um Prüflinge für bestimmte Betriebsbereiche auszuwählen [2]. Es hat sich gezeigt, dass sich mit diesen Methoden die Modellgenauigkeit für die gleiche Anzahl von Prüfungen verbessern lässt.

¹ Die Kälteleistung kann mithilfe des Kältemittelmassenstroms und der Betriebsbedingungen (T_s, T_d, Unterkühlung und Überhitzung) berechnet werden. Dabei muss die Kennlinie nicht angepasst werden, da die Unsicherheitsfortpflanzung in diesem Bericht nicht enthalten ist.

Neue Normen, die ggf. die Menge der veröffentlichten Daten erhöhen, schreiben bereits zusätzliche Messpunkte vor. So bestimmt z. B. die EN 12900, dass Hersteller von Verdichtern mit Teillastbetrieb Daten von bis zu vier (4) Leistungsstufen veröffentlichen sollen.

UNSICHERHEIT DURCH DEN UNTERSCHIED ZWISCHEN NENN- UND PRÜFBEDINGUNGEN

Prüfnormen für Verdichter erlauben Abweichungen der tatsächlich gemessenen Prüfbedingungen von den spezifizierten Nenn-Prüfbedingungen. Das bedeutet: Wenn die tatsächlichen Prüfbedingungen (Eingangsgrößen) ggf. leicht von den spezifizierten Prüfbedingungen abweichen, jedoch der zulässige Toleranzbereich eingehalten wird, können die Verdichterleistungsdaten dennoch akzeptabel sein. Typische Nenn-Prüfbedingungen: saugseitiger Kältemitteldruck (oder saugseitige Taupunkttemperatur), druckseitiger Kältemitteldruck (oder druckseitige Taupunkttemperatur), Sauggastemperatur (oder Sauggasüberhitzung), Umgebungstemperatur, Flüssigkeitsunterkühlung, Verdichterdrehzahl bei offenen Verdichtern oder elektrische Netzspannung und Frequenz bei Elektromotoren. Typische mindestens anzugebende Verdichterleistungsdaten sind s. B. Kältemittelmassenstrom, Leistungsaufnahme und berechnete Kälteleistungszahl (COP, EER usw.). Diese zu publizierenden Verdichterleistungsdaten können mit [3] auf Nenn-Prüfbedingungen umgerechnet werden. Die grundlegende Annahme in [3] lautet, dass der Liefergrad und Gütegrad des Verdichters zum Anpassen der tatsächlichen (Mess-)Bedingungen an die Nenn-Prüfbedingungen konstant sind.

Für einen einstufigen Verdrängerverdichter (ohne Flüssigkeitseinspritzung für die Regelung der Druckgastemperatur oder für eine Motortemperaturregelung) zeigt Abbildung 1 die Grundbedingungen 1 (Verdichtereintritt) und 2 (Verdichteraustritt). Nun kann wie in Abbildung 1 gezeigt die tatsächliche Größe am Eintritt innerhalb des Abweichungskreises nahe 1 (P_1 , T_1) liegen und die tatsächliche Größe am Austritt nahe 2 (P_2) variieren. Darüber hinaus können Abweichungen bei Eingangsgrößen wie Verdichterdrehzahl (U/min oder Hz) und Flüssigkeitsunterkühlung ebenfalls mit [3] berücksichtigt werden.

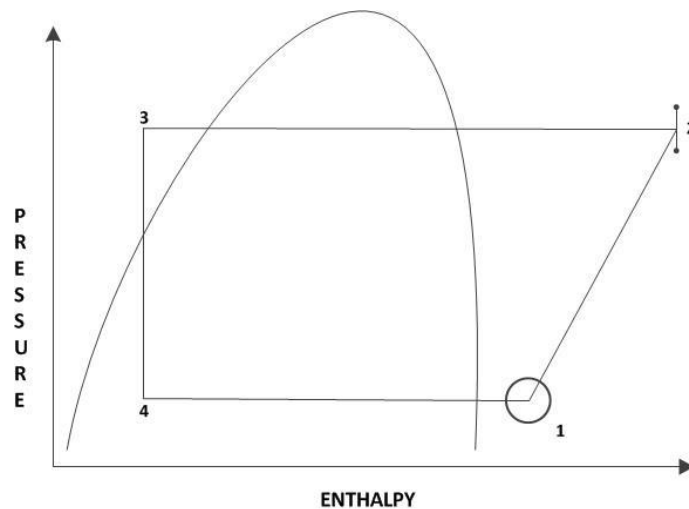


Abbildung 1: Druck-Enthalpie-Diagramm für Prozess 1 bis 2 (einstufige Verdichtung)

Beispiel:

Es wird ein Verdichter mit einem Hubvolumen von $0,067739 \text{ ft}^3/\text{U}$ (1,92 Liter) betrachtet, der mit dem Kältemittel R134a betrieben wird. Er ist an einem Ort mit akzeptabler Umgebungstemperatur aufgestellt und bietet eine akzeptable Ölwurfrate. Im Folgenden werden spezifizierte Prüfbedingungen gezeigt. Dieses Beispiel zielt darauf ab, den Kältemittelmassenstrom, die Leistungsaufnahme und den EER bei der tatsächlichen und den spezifizierten Bedingung zu berechnen.

	spezifizierte Prüfbedingung	Tatsächliche Prüfbedingung
Saugdruck (psia)	54,75	55,3
Verdichtungsenddruck (psia)	213,41	211,4
Saugtemp. (°F)/Überhitzung (°R)	65/20	69/24
Drehzahl (U/min)	1750	1733
Flüssigkeitsunterkühlung Verflüssiger (°F)	15	15
Kältemittelfluss (lb/min)	122,64	121,5
Leistungsaufnahme, kW (Btu/min)	42,95 (2444,85)	42,39 (2412,82)
Kälteleistung, Btu/min (t)	11316 (56,57)	11291 (56,454)

EER (Btu/Wh)

15,79

15,98

Berechnete
Parameter

$$\eta_{va} = \frac{m_a \cdot v_a}{V \cdot N_a} \cdot 100 = \frac{121.5 \times 0.91827}{0.067739 \times 1733} \times 100 = 95.04\%$$

$$Q_a = m_a \cdot (h_{1a} - h_{f2a}) = 121.5 \cdot (178.51 - 85.58) = 11291 \text{ btu/min}$$

$$\eta_{ia} = \frac{m_a (h_{2ia} - h_{1a})}{P_a} \cdot 100 = \frac{121.5 \times (191.38 - 178.51)}{2412.82} \times 100 = 64.81\%$$

$$EER_a = \frac{Q_a \left(\frac{\text{btu}}{\text{min}} \right)}{P_a \left(\frac{\text{btu}}{\text{min}} \right)} \times 3.412 = \frac{11291}{2412.82} \times 3.412 = 15.98 \frac{\text{btu}}{\text{w. hr}}$$

Die obige Berechnung nutzt die Gleichungen (2), (5) und (6) aus [3], um die tatsächliche Kälteleistung, den tatsächlichen Liefergrad und Gütegrad sowie den tatsächlichen EER zu berechnen. Diese Berechnung darf nur im Rahmen des in Tabelle 3 in [3] spezifizierten Grenzbereichs verwendet werden.

$$m = \frac{\eta_{va} \cdot V \cdot N_a}{v_a \cdot 100} = \frac{95.04 \times 0.067739 \times 1750}{0.91861 \times 100} = 122.64 \text{ lb/min}$$

$$P = \frac{m \cdot (h_{2i} - h_1)}{\eta_{ia}} \cdot 100 = \frac{122.64 \times (190.60 - 177.68)}{64.81} \times 100 = 2444.85 \text{ btu/min}$$

$$Q = m \cdot (h_1 - h_{f2}) = 122.64 \cdot (177.68 - 85.41) = 11316 \text{ btu/min}$$

$$EER = \frac{Q \left(\frac{\text{btu}}{\text{min}} \right)}{P \left(\frac{\text{btu}}{\text{min}} \right)} \times 3.412 = \frac{11316}{2444.85} \times 3.412 = 15.79 \frac{\text{btu}}{\text{w. hr}}$$

Die obige Berechnung nutzt die Gleichungen (7) bis (11) von [3], um den Kältemittelmassenstrom, die Verdichterleistung und den EER für eine spezifizierte Bedingung zu berechnen.

Anmerkungen:

1. Die Differenz zwischen tatsächlicher Prüfbedingung und spezifizierter Prüfbedingung kann Abweichungen in der Größenordnung von 1,5 % beim Massenstrom bzw. von 2 % bei der Leistungsaufnahme verursachen.
2. Darüber hinaus können ähnliche prozentuale Abweichungen (innerhalb des Toleranzbereichs) in Bezug auf Eingangsdrücke und -temperaturen zu unterschiedlichen Abweichungen im Massenstrom und in der Leistungsaufnahme verschiedener Kältemittel führen.
3. Die tatsächliche Prüfbedingung kann sich noch stärker von der spezifizierten unterscheiden, wenn das System beim Erfassen der Prüfparameter nicht stabil ist oder sich in einem Übergangszustand befindet.

REFERENZEN

1. Aute, V. und Martin, C., A Comprehensive Evaluation of Regression Uncertainty and the Effect of Sample Size on the AHRI-540 Method of Compressor Performance Representation. 23rd International Compressor Engineering Conference, Universität Purdue, 11. bis 14. Juli 2016.
2. Aute, V., Martin, C. und Radermacher, R., AHRI Research Project 8013: A Study of Methods to Represent Compressor Performance Data over an Operating Envelope Based on a Finite Set of Test Data. AHRI 2015.
3. EN 13771-1. (2016). Compressors and condensing units for refrigeration - Performance testing and test methods.