

Mit Nichts in die Kälte

Für Quantencomputer sind Verdünnungskryostate notwendig, die ein breites Spektrum an Vakuumequipment nutzen.

Stefan Lausberg, Manuel Brando und Thomas Lühmann

Quantencomputer sind in aller Munde, auch wenn ihre kommerzielle Nutzung noch nicht absehbar ist. Von IBM, Intel, Microsoft oder Google gibt es bereits Prototypen, die einfache Rechenoperationen durchführen können. Quantencomputer ermöglichen Rechenleistungen, die millionenfach größer sind als die klassischer Computer. Die zugrunde liegenden Quanteneffekte treten aber häufig erst bei sehr tiefen Temperaturen auf, weshalb Kryotechnik eine zentrale Rolle spielt. Bei den meisten Ansätzen sind Temperaturen im Bereich von 0,1 K nötig, die fast ausschließlich mit Verdünnungskryostaten realisierbar sind. Diese arbeiten mit einem Gemisch aus ^3He und ^4He . Solche Anlagen existieren seit Jahrzehnten, aber in

den letzten Jahren gibt es dank der Forschung an Quantencomputern einen Boom. Auch in anderen Bereichen der Grundlagenforschung wie der Festkörperphysik kommen Verdünnungskryostaten zum Einsatz. Jedes Jahr werden weltweit mehrere hundert gebaut. Entsprechend gestiegen ist die Nachfrage nach Vakuumpumpen, welche die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischung zirkulieren.

Der Fortschritt der Vakuumtechnik verbessert den zuverlässigen Betrieb von Verdünnungskryostaten. Exemplarisch wird dies an einem Beispiel aus dem Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe (MPI CPfS) in Dresden gezeigt. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt dort ist die Untersuchung des Verhaltens stark

wechselwirkender Elektronensysteme in Festkörpern, insbesondere von Metallen, unkonventionellen Supraleitern und exotischen Magnetsystemen [1–5]. In diesen Materialien ist die relevante Energieskala sehr niedrig, und daher spielen Quantenfluktuationen und deren kritisches Verhalten eine wesentliche Rolle. Um diese Phänomene zu untersuchen, sind Messungen notwendig, die allesamt den Einsatz von Verdünnungskryostaten erfordern.

Verdünnungskryostate beruhen auf dem Wechselspiel der beiden stabilen Helium-Isotope ^3He und ^4He (Abb. 1). Um tiefe Temperaturen zu erreichen, wird zunächst ein Bad aus flüssigem Helium verwendet, dessen Temperatur bei 4,2 K liegt.

In der 1K-Stufe wird die Temperatur lokal weiter reduziert, indem an einem Teil des flüssigen Heliumbads gepumpt wird (⁴He-Pumpe). Durch den hierbei künstlich reduzierten Dampfdruck stellt sich eine Temperatur von etwa 1,3 K ein. Die hermetisch von diesem Helium-Bad getrennte, stark an ³He angereicherte ³He/⁴He-Mischung gelangt durch unterschiedliche Wärmetauscher bis in die Mischkammer. Die Wärmetauscher dienen dazu, die einströmende „warme“ Mischung mit der zurückströmenden kälteren Mischung im Gegenstromprinzip weiter abzukühlen. Unterhalb von 0,8 K separiert sich das flüssige ³He/⁴He-Gemisch in zwei Phasen, sodass in der Mischkammer eine nahezu reine, leichtere ³He-Phase schwimmend auf einer schwereren ⁴He-reichen Phase vorliegt. Letztere weist auch bei tiefsten Temperaturen noch einen ³He-Gehalt von etwa 6 % auf.

Die ⁴He-reiche Phase der Mischkammer ist mit einem Behälter, der Still, verbunden, dessen Temperatur bei 0,7 K liegt. Dort ist der Dampfdruck von ³He rund tausendmal höher als der von ⁴He, sodass eine Pumpe hier fast ausschließlich ³He-Gas fördert (³He-Pumpe). Durch das Abpumpen von ³He sinkt der ³He-Gehalt der ⁴He-reichen Phase in der Still auf unter 1 %. Durch osmotischen Druck strömt ³He aus der Mischkammer nach, sodass die dortige ³He-Konzentration in der ⁴He-reichen Phase ebenfalls abnimmt. In der Folge gehen ³He-Atome aus der ³He-reichen Phase in die ⁴He-reiche Phase über, da letztere einen ³He-Anteil von 6 % anstrebt.

Das Überwinden der Phasengrenze kostet Energie, die der Umgebung entzogen wird. Dadurch kühlt sich die Mischkammer ab. Aufgrund unvermeidbarer kleiner Wärmelecks stellt sich nach einiger Zeit eine Gleichgewichtstemperatur ein, die im einstelligen Millikelvin-Bereich liegen kann [6].

³He-Pumpe

Da ³He in natürlich vorkommendem Helium nur eine geringe Konzentration besitzt, ist es deutlich teurer als ⁴He und kann pro Normliter bis zu 3000 Euro kosten. Um zu vermeiden, dass ³He aus dem geschlossenen Kreislauf tritt, muss die Leckrate des Gesamtsystems klein sein. Daher herrscht an jeder Stelle des Kreislaufs ein Unterdruck. Auch Luft im System ist kritisch, da sie in den dünnen Kapillaren festfrieren und das Zirkulieren der Mischung blockieren kann. Im schlimmsten Fall könnten diese dünnen Leitungen beim erneuten Aufwärmen platzen, wenn sich eingeschlossene Gase ausdehnen. Zudem sollten weder Öl noch Partikel in das System emittiert werden, um die Kapillaren im Gaskreislauf nicht zu verstopfen.

In der Vergangenheit kamen häufig Drehschieberpumpen (Infokasten) zum Einsatz, bei denen aufwändig das Öl aus dem Gasstrom abzuscheiden war. Da selbst geringe Öl-Mengen im Mischkreislauf zu einem Totschaden am Kryostaten führen können, gilt es, auf Öl von vornherein zu verzichten.

Zudem spielen die technischen Parameter der ³He-Pumpe eine essenzielle Rolle. So muss beim gegebenen Gasfluss ein Ansaugdruck zwischen $1 \cdot 10^{-2}$ und 1 mbar möglich sein, während sich der Auslassdruck bei 100 bis 500 mbar einstellt.

Pumpe ohne Öl

Zweistufige Drehschieberpumpen können leicht einen Enddruck von etwa $1 \cdot 10^{-3}$ mbar erreichen und waren damit lange Zeit konkurrenzlos. „Trockene“, d. h. Öl-freie, Vorvakuumpumpen haben das geändert. Sie behindern den Gasrückstrom durch möglichst kleine Spalte oder andere Dichtmaterialien. Lediglich in Lagern oder Getrieberäumen können Fette oder Öle vorkommen. Allerdings ist der Enddruck mit $1 \cdot 10^{-2}$ mbar etwas schlechter.

Die Verdünnungskryostate am MPI CPFS sind mit Drehschieberpumpen versehen und besitzen Kühlfallen, die bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff eventuell vorhandenes Öl aus dem Mischkreislauf abscheiden. Um generell eine Ölkontamination zu vermeiden, galt es nun, die Drehschie-

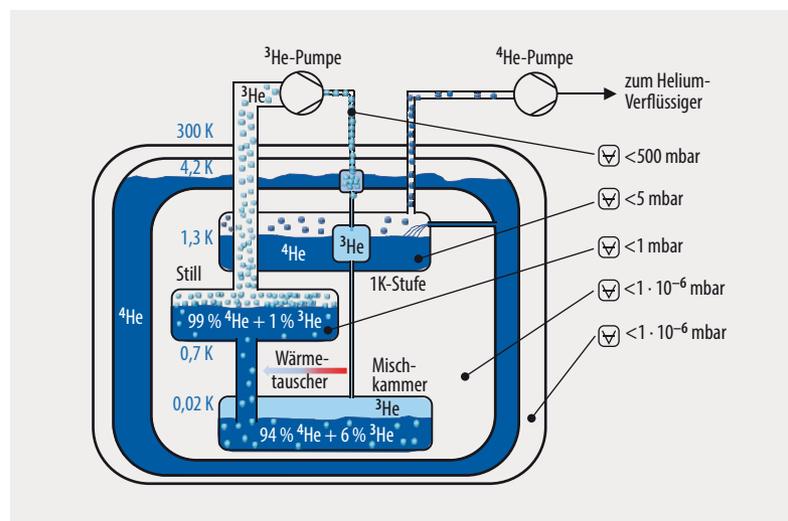


Abb. 1 In einem Verdünnungskryostaten ist das Temperaturniveau bei 4,2 K von flüssigem Helium gegen 300 K durch ein Isolationsvakuum bei einem Druck unterhalb von $1 \cdot 10^{-6}$ mbar isoliert. Auch die anderen Temperaturniveaus, wie die von Still und Mischkammer, sind gegen ihre Umgebung isoliert.

berpumpe eines Kryostaten gegen eine trockene Pumpe zu tauschen, ohne die Kälteleistung zu reduzieren. Dafür kam die mehrstufige Wälzkolbenpumpe ECODRY 65 plus von Leybold zum Einsatz. Diese trockene Vorvakuumpumpe ist spaltgedichtet, d. h. die vakuumerzeugenden Drehkolben berühren sich nicht. Dadurch emittiert die Pumpe keine Partikel. Nur der Getriebekasten der Pumpe enthält Öl, nicht aber der Teil, durch den das Gas strömt. Die Pumpe arbeitet sehr leise und kommt mehrere Jahre ohne Wartung aus.

Das Saugvermögen (**Infokasten**) der Drehschieberpumpe und der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe ist bei 0,1 bis 10 mbar vergleichbar (**Abb. 2**). Dass der Auslassdruck einer Pumpe im Mischkreislauf eines Verdünnungskryostaten kleiner als Atmosphärendruck ist, ist bei der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe von Vorteil, da diesen erreichbaren Enddruck verkleinert. Verdünnungskryostate erfordern eine Leckrate von unter $1 \cdot 10^{-6}$ mbar · l/s. Nach dem Verschließen des Gasballast-Anschlusses betrug die Leckrate $5 \cdot 10^{-7}$ mbar · l/s.

Nach dem Tausch der Pumpen startete das Einkühlen der $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischung mit anschließender Zirkulation (**Abb. 3**). Der Versuch ergab eine Mischkammertemperatur von etwa 21 mK – ähnlich wie bei der Drehschieberpumpe. Somit kann die mehrstufige Wälzkolbenpumpe die zweistufige Drehschieberpumpe voll ersetzen, und zwar ohne Öl.

Systeme von Pumpen

Auch beim Einsatz von Pumpsystemen in Verdünnungskryostaten mit hoher Kälteleistung hat der

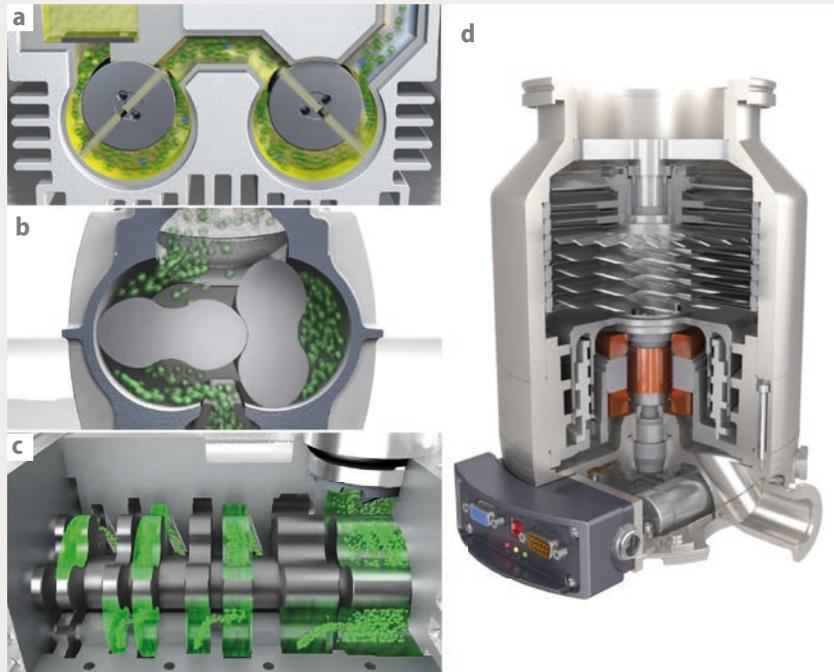
Vakuumtechnologie

Das **Saugvermögen** S beschreibt die Leistungsfähigkeit von Vakuumpumpen und gibt an, wie viel Volumen pro Zeiteinheit sich verschieben lässt. Um das Saugvermögen einer Vakuumpumpe zu ermitteln, wird sie an eine Testkammer angeschlossen. In diese wird ein **Gasfluss** Q fester Größe und Gasart gelassen. Nach einiger Zeit stellen sich ein Gleichgewichtszustand und ein **Druck** p in der Kammer ein. Das Saugvermögen beträgt $S = Q/p$. Wenn eine Vakuumpumpe ihren Enddruck erreicht, verschwindet das Saugvermögen.

Es gibt zahlreiche Arten von Vakuumpumpen (Details in [7]). Primäre Vakuumpumpen können einen Druckgradienten von ihrem erreichbaren Enddruck bis zum Atmosphärendruck erzeugen. Sekundäre Vakuumpumpen erzeugen einen Druckgradienten von ihrem Ansaugdruck bis zum Übergabedruck, der von einer primären Vakuumpumpe stammt. Ein System aus Pumpen erlaubt viel niedrigere Drücke als eine einzelne.

Drehschieberpumpen (a) erzeugen den Druckgradienten über die Kompression von Gasen mittels beweglicher Schieber, die den Raum, der das abzupumpende Gas enthält, verkleinern. Die Schieber befinden sich in einem exzentrisch aufgehängten Rotor. Mit einem zweiten Rotor in Reihe geschaltet resultiert eine zweistufige Drehschieberpumpe. Der zweite Rotor verhält sich wie eine integrierte sekundäre Vakuumpumpe. Drehschieberpumpen sind mit Öl geschmiert. Der typische Arbeitsbereich zweistufiger Drehschieberpumpen liegt bei $1 \cdot 10^{-3}$ bis 1000 mbar.

Wälzkolbenpumpen (b) sind sekundäre Vakuumpumpen, die einen Druckgradienten über zwei rotierende Wälzkolben herstellen,



die sich nicht berühren. Dies erlaubt ein sehr hohes Saugvermögen und sehr niedrige Enddrücke. Wälzkolbenpumpen arbeiten mit Ansaugdrücken zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ und 10 mbar.

Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Stufen lässt sich eine primäre Vakuumpumpe kreieren (c): die **mehrstufige Wälzkolbenpumpe**. Bei ihr findet sich Öl nur im Getriebekasten, sie ist also „trocken“. Der erreichbare Enddruck liegt bei etwa $1 \cdot 10^{-2}$ mbar.

In einer **Turbomolekularpumpe** (d) drehen sich Rotorblätter im Betrieb mit der Schallgeschwindigkeit. Mehrere Stator- und

Rotorblätter sorgen für den Gastransport in die Vorvakuumpumpe. Um auch Vorvakuumpumpen mit höherem Enddruck zulassen zu können, gibt es eine Holweck-Stufe, die den Übergabedruck um ein bis zwei Größenordnungen anhebt. Die Turbomolekularpumpe ist die am häufigsten eingesetzte sekundäre Vakuumpumpe. Ihr Kernarbeitsbereich liegt unterhalb von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar. Aber auch unterhalb von 1 mbar besitzt sie ein Saugvermögen, das deutlich über dem von primären Vakuumpumpen und sogar Wälzkolbenpumpen liegen kann.

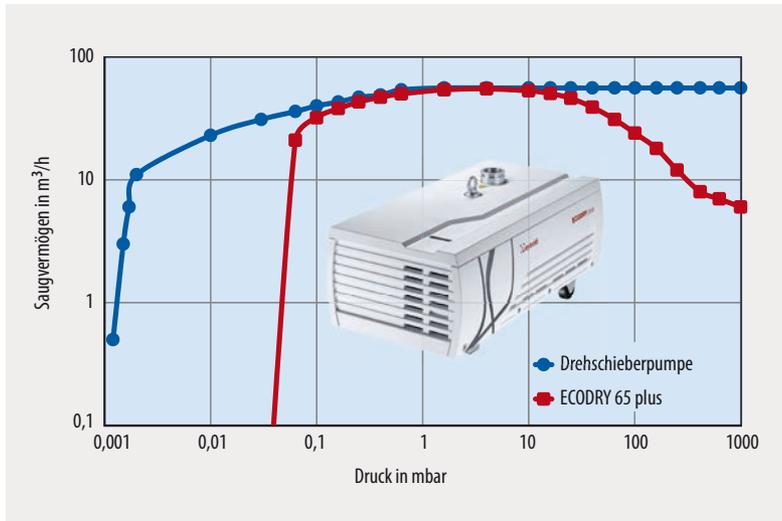


Abb. 2 Die Saugvermögenskurven der Drehschieberpumpe sowie der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe ECODRY 65 plus wurden für Stickstoff als abzupumpendes Gas gemessen, wobei der Pumpenauslassflansch bei Atmosphärendruck lag. Bei der ECODRY 65 plus sollte das Saugvermögen für ³He ähnlich sein.

Fortschritt der Vakuumtechnologie zu erheblichen Einsparungen in Größe und Energieverbrauch geführt. Ein hohes Saugvermögen ist nicht durch eine einzelne primäre Vakuumpumpe zu erreichen. Denn diese müsste sehr schwer sein, hätte eine hohe elektrische Leistungsaufnahme und würde eine zusätzliche Wasserkühlung erfordern. Weitaus ökonomischer ist ein System aus zwei Vakuumpumpen. Eine nahegelegene sekundäre Vorvakuumpumpe ist die Wälzkolbenpumpe, da diese das Saugvermögen der primären Vakuumpumpe um ein Vielfaches erhöhen kann (**Infokasten**). Auch Turbomolekularpumpen

sind denkbar, obwohl der Ansaugdruck in Mischkreisläufen nicht in ihrem Kernarbeitsbereich liegt. Bei beiden Pumpsystemen nimmt das Saugvermögen ausgehend vom Atmosphärendruck zu niedrigeren Drücken leicht zu. Dies spiegelt lediglich das Saugvermögen der Vorvakuumpumpe wider. Zwischen 100 und 10 mbar setzt das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe ein, erreicht ein Plateau und sinkt schließlich schnell auf Null ab. Im Gegensatz dazu steigt das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe erst unterhalb von 1 mbar an. Nahe des Schnittpunktes beider Systeme sind das Saugvermögen und der

damit verbundene Gasfluss vergleichbar.

Erst seit kurzem ist bekannt, dass Turbomolekularpumpen in diesem Druckbereich sogar zu erheblichen Einsparungen führen können. Verglichen mit Wälzkolbenpumpen sind sie deutlich leichter, günstiger, wartungsärmer und verbrauchen weniger elektrische Leistung.

Fazit

Ohne Vakuumtechnik wären keine Verdünnungskryostate möglich. Die ideale Vorvakuumpumpe sollte ein ausreichend großes Saugvermögen haben, weder Öl noch Partikel in das System emittieren und eine sehr niedrige Leckrate besitzen. Ein Feldtest hat gezeigt, dass sich eine ölgeschmierte Drehschieberpumpe durch eine trockene mehrstufige Wälzkolbenpumpe ersetzen lässt. Für größere Kälteleistungen sind sekundäre Vakuumpumpen nötig, wobei Turbomolekularpumpen die Effizienz der Verdünnungskryostate enorm verbessern können. Mit der Weiterentwicklung der Quantencomputer wird auch die Nachfrage an Vakuumequipment steigen.

Literatur

- [1] A. Steppke et al., Science **339**, 933 (2013)
- [2] C. W. Hicks et al., Science **344**, 283 (2014)
- [3] E. Schubert et al, Science **351**, 485 (2016)
- [4] S. Friedemann et al, Nat. Phys. **14**, 62 (2018)
- [5] L. S. Wu et al, Nat. Commun. **10**, 698 (2019)
- [6] Ch. Enss und S. Hunklinger, Low Temperature Physics, Springer, Heidelberg (2005)
- [7] K. Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 11. Auflage, Springer Viewg (2013)

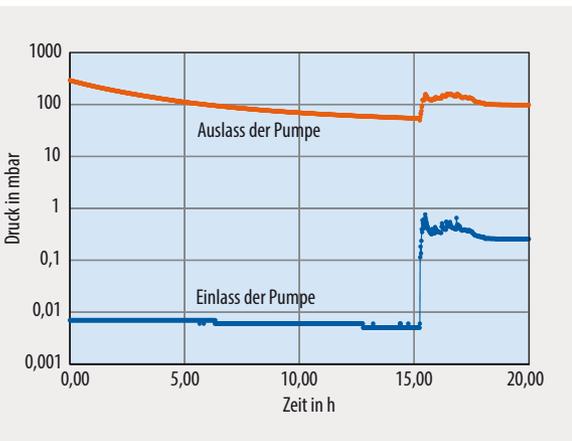


Abb. 3 Das Einlassen der ³He/⁴He-Mischung begann bei t = 0 h. Nach etwa 15 Stunden war dieser Vorgang abgeschlossen, und die Zirkulation konnte starten. Der stationäre Zustand stellte sich bei einem Einlassdruck von p = 0,256 mbar und einem Auslassdruck von 100 mbar ein. Der Gasfluss betrug etwa 3,2 mbar · l/s.

Die Autoren

Dr. Stefan Lausberg, Leybold GmbH, Bonner Str. 498, 50968 Köln; **Dr. Manuel Brando** und **Dr. Thomas Lühmann**, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Nöthnitzer Str. 40, 01187 Dresden