

Die Schlüsselrolle der Kryotechnik in der Wasserstoff-Energiewirtschaft

Prof. Dr. H. Quack

TU Dresden, Professur für Kälte- und Kryotechnik

Im Rahmen der zukünftigen Wasserstoff-Energiewirtschaft wird die Verflüssigung des Wasserstoffs zum Zwecke der Lagerung und des einfachen Transportes eine wichtige Rolle spielen. Für die Verflüssigung des Wasserstoffes benötigt man Energie, die im Gesamtszenario nicht übersehen werden darf. Es wird hier nach einem Verflüssigungsprozess gesucht, der eine deutliche Energieeinsparung gegenüber dem heutigen Stand der Technik bringt. Als Hauptverbesserung wird die Wahl eines Helium-Neon-Gemisches als Kältemittel für einen reinen Gaskälteprozess vorgeschlagen. Damit und mit Hilfe einer Reihe weiterer neuer Prozess-Schritte kann eine deutliche Senkung des Energiebedarfs gegenüber den besten heutigen Anlagen erreicht werden. Als Richtwert für den Energiebedarf der Wasserstoff-Verflüssigung sollte in Zukunft ein Wert von 7 KWH/KG verwendet werden.

The key role of cryogenics in the future hydrogen energy economy

In the future hydrogen energy economy the liquefaction of the hydrogen for storage and easier transportation will play an important role. For the liquefaction, energy is needed, which can not be neglected in the overall energy economy. In our work we have been looking for a liquefaction process, which brings a drastic energy saving compared with present day technology. We found the main improvement in the choice of a mixture of helium and neon as refrigerant for a Brayton cycle. With this choice and a number of additional innovative process steps, the energy consumption for the liquefaction can be quite lower than in the best plants operating today. The new benchmark value for the power consumption of hydrogen liquefaction should be 7 KWH/KG.

1 Einleitung

Dem Wasserstoff wird für die Energiewirtschaft der Zukunft eine wichtige Rolle als Energieträger prophezeit. Hierbei konkurriert er mit den herkömmlichen Energieträgern Kohle, flüssige Kohlenwasserstoffe, Erdgas und Elektrizität. In Tabelle 1 werden diese Energieträger bezüglich einiger Gesichtspunkte verglichen. Je mehr Pluszeichen und ja weniger Minuszeichen in einem Feld stehen, desto besser erfüllt der jeweilige Energieträger die Anforderungen. Zwei Fragezeichen bedeuten, dass heute noch nicht klar ist, aus welchen Quellen der jeweilige Energieträger in Zukunft hauptsächlich gewonnen wird. Ein Plus- mit einem Fragezeichen soll andeuten, dass ein positives Potential vorhanden, die Technologie jedoch noch nicht ausgereift ist.

Tabelle 1 Vergleich verschiedener Energieträger

	Kohle	Flüssige Kohlenwasserstoffe	Erdgas	Wasserstoff	Elektrizität
Gewinnung	+	++	++	??	??
Transport über lange Strecken	++	+++	+	+?	-
Transport über kurze Strecken	+	++	++	+?	++
Speicherfähigkeit	++	++	+	+?	-
Tauglich für mobilen Einsatz	-	++	+?	+?	-
Umweltverträglichkeit beim Endverbraucher	---	--	-	+	+

Die Vorteile des Wasserstoffs liegen in erster Linie bei der Umweltverträglichkeit beim Endverbraucher. Die Aussicht, dass aus dem Auspuff eines Kraftfahrzeuges mit Brennstoffzellen-Antrieb in Zukunft nur noch Wasser bzw. Wasserdampf austritt, veranlasst die Automobilindustrie zu großen Entwicklungsanstrengungen.

Skeptiker weisen zwar darauf hin, dass noch nicht klar ist, wie denn der Wasserstoff in Zukunft umweltfreundlich und ökonomisch gewonnen werden wird. Die Verfechter des Wasserstoffs verweisen dann auf die künftigen Möglichkeiten der Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen wie Wasserkraft, Solarenergie, Windenergie oder Biomasse. Zuweilen wird auch darauf aufmerksam gemacht, dass selbst wenn der Wasserstoff aus Erdöl oder Erdgas hergestellt würde, die Gesamt-CO₂-Bilanz noch vorteilhaft wäre, weil der Brennstoff in der Kette Reformier-Brennstoffzelle effizienter genutzt werde als in Verbrennungs-Kraftmaschinen oder Verbrennungs-Kraftwerken.

Bei der öffentlichen Diskussion wird meistens davon ausgegangen, dass die Zwischenschritte in der Wasserstoff-Kette zwischen Gewinnung und Verbrauch, d.h. der Transport über große Strecken und die stationäre bzw. mobile Speicherung sowohl kostengünstig als auch energetisch ohne großen Aufwand bewerkstelligt werden können.

Wenn Wasserstoff in größeren Mengen gelagert und über größere Strecken transportiert werden muss, dann sollte man ihn vorher verflüssigen. Auch für den Einsatz bei mobilen Endverbrauchern, bei denen das Gesamtgewicht von Tank und Treibstoff eine wichtige Rolle spielt, steht die Flüssigspeicherung im Vordergrund des Interesses. Deshalb gibt es große Anstrengungen zur Entwicklung von verlustarmen Lagertanks und sicheren Tankstellen [1, 2].

Am Anfang der Kette steht jedoch die Verflüssigung des Wasserstoffs. Wenn für die Verflüssigung des Wasserstoffs große Energiemengen benötigt würden, wäre die Gesamtbilanz der ganzen Wasserstoffwirtschaft entscheidend beeinträchtigt.

2 Wasserstoff-Verflüssigung

Wasserstoff ist bei Umgebungstemperatur gasförmig und muss auf sehr tiefe Temperaturen abgekühlt werden, bevor es flüssig wird. Die Siedetemperatur bei Atmosphärendruck liegt bei 20,3 K, d.h. etwa -253°C . Die Verflüssigung gelang erstmals 1898 dem englischen Forscher James Dewar [3]. Das Kühlverfahren bestand aus einer Reihe hintereinandergeschalteter Kühlkreisläufe mit unterschiedlichen Kältemitteln, einer sog. Kaskade, und war sehr aufwändig. Als zusätzliche Erschwernis stellte es sich dann noch heraus, dass ein Großteil der Wasserstoffmoleküle bei der Abkühlung eine innere Umwandlung durchmachen. Bei Umgebungstemperatur sind die Kernspins der beiden Atome bei 75% der Moleküle parallel zueinander ausgerichtet (Ortho-Wasserstoff, $o\text{-H}_2$). Bei tiefer Temperatur dagegen sind bei allen Molekülen die Kernspins der beiden Atome entgegengesetzt gerichtet (Para-Wasserstoff, $p\text{-H}_2$). Hat der Wasserstoff immer gerade die Zusammensetzung, die der Gleichgewichtskonzentration bei der jeweiligen Temperatur entspricht, so spricht man von Equilibrium-Wasserstoff ($e\text{-H}_2$). Die Umwandlung von $o\text{-H}_2$ in $p\text{-H}_2$, die beim Abkühlen des Gases von alleine oder mit Hilfe eines Katalysators abläuft, ist exotherm, d.h. die Kälteanlage muss eine zusätzliche Kälteleistung erbringen, um diese Umwandlungswärme zu kompensieren. Chemisch verhalten sich übrigens alle diese Wasserstoffmodifikationen gleich.

Da die bei der Verflüssigung von Wasserstoff notwendigen tiefen Temperaturen lange nur für die Grundlagenforschung von Interesse waren, gab es entsprechende Verflüssigungsanlagen bis 1950 weltweit nur in etwa einem Dutzend Universitätslaboratorien.

In den fünfziger Jahren ergab sich dann ein Bedarf für größere Mengen flüssigen Wasserstoffs aus der Raumfahrt und einigen Verarbeitungsprozessen, und es entwickelte sich eine industrielle Anlagentechnik [4]. Insgesamt blieb der Bedarf jedoch klein. In Europa wurde vor etwa 20 Jahren drei Anlagen gebaut, die aber bis heute noch nicht voll ausgelastet sind, weil der Bedarf sich langsamer entwickelte als erwartet.

Diese Anlagen wurden mit der jeweils gerade vorhandenen Technologie mit möglichst geringen Investitionskosten gebaut. Energieeffizienz spielte keine primäre Rolle. Anlagen mittlerer Größe, wie z.B. die Linde Anlage in Ingolstadt haben einen Energiebedarf von etwa 15 kWh/kg, während die besten Großanlagen in den USA auf einen Energiebedarf von etwa 10 kWh/kg [4] kommen.

Wenn heute Studien zur Wasserstoffwirtschaft der Zukunft veröffentlicht werden, so geht man bei der Wasserstoffverflüssigung zumeist von diesem Wert von 10 kWh/kg aus. Der untere Heizwert von Wasserstoff beträgt etwa 120 kWh/kg. Auf diesen Wert werden meist die Wirkungsgrade von Brennstoffzellen-Systemen bezogen. Für stationäre Anlagen werden Wirkungsgrade von bis zu 60% angegeben, während für mobile Antriebssysteme bei Berücksichtigung des Eigenverbrauchs die besten Werte bei 40% liegen. Ein Kilogramm Wasserstoff hat somit ein "Antriebspotential" von $120 \times 0,4 = 48$ kWh. Da spielt es schon eine große Rolle, ob für die Verflüssigung des Wasserstoffs 15 oder 10 kWh oder eventuell noch weniger verbraucht wurde.

Welcher Energieverbrauch ist also zur Wasserstoff-Verflüssigung tatsächlich notwendig ist, d.h. wo liegen die Verlustquellen in Verflüssigungsanlagen und wie

können diese durch geschickte Prozessgestaltung bzw. Komponentenentwicklung reduziert werden?

3 Energiebedarf bei der Verflüssigung

Der erste Schritt bei der Untersuchung von Prozessen der Energieumwandlung ist die Exergie-Analyse. Dabei wird ermittelt, wie viel Primärenergie bei reversibler Prozessführung für die gestellte Aufgabe benötigt wird. Wenn es sich um die Kompression und das Abkühlen von Gasen und Flüssigkeiten handelt, dann lässt sich dieser Mindestenergiebedarf, genannt spezifische Exergie, aus der Enthalpie und der Entropie des Gases berechnen und in Diagrammen anschaulich darstellen. Bild 1 zeigt die spezifische Exergie von e-H₂ in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Ausgangspunkt des Diagramms ist die spezifische Exergie von Wasserstoffgas bei 0,1 MPa und 300 K, welche als Nullpunkt der Ordinate gewählt wird. Aus dem Diagramm erkennt man, wie viel Energie man mindestens aufwenden muss, um von diesem Startpunkt aus einen gewünschten Zustandspunkt bei einem anderen Druck bzw. einer anderen Temperatur zu erreichen. Der höchste Punkt des Diagramms repräsentiert den flüssigen Wasserstoff. Dessen spezifische Exergie beträgt 14,2 MJ/kg.

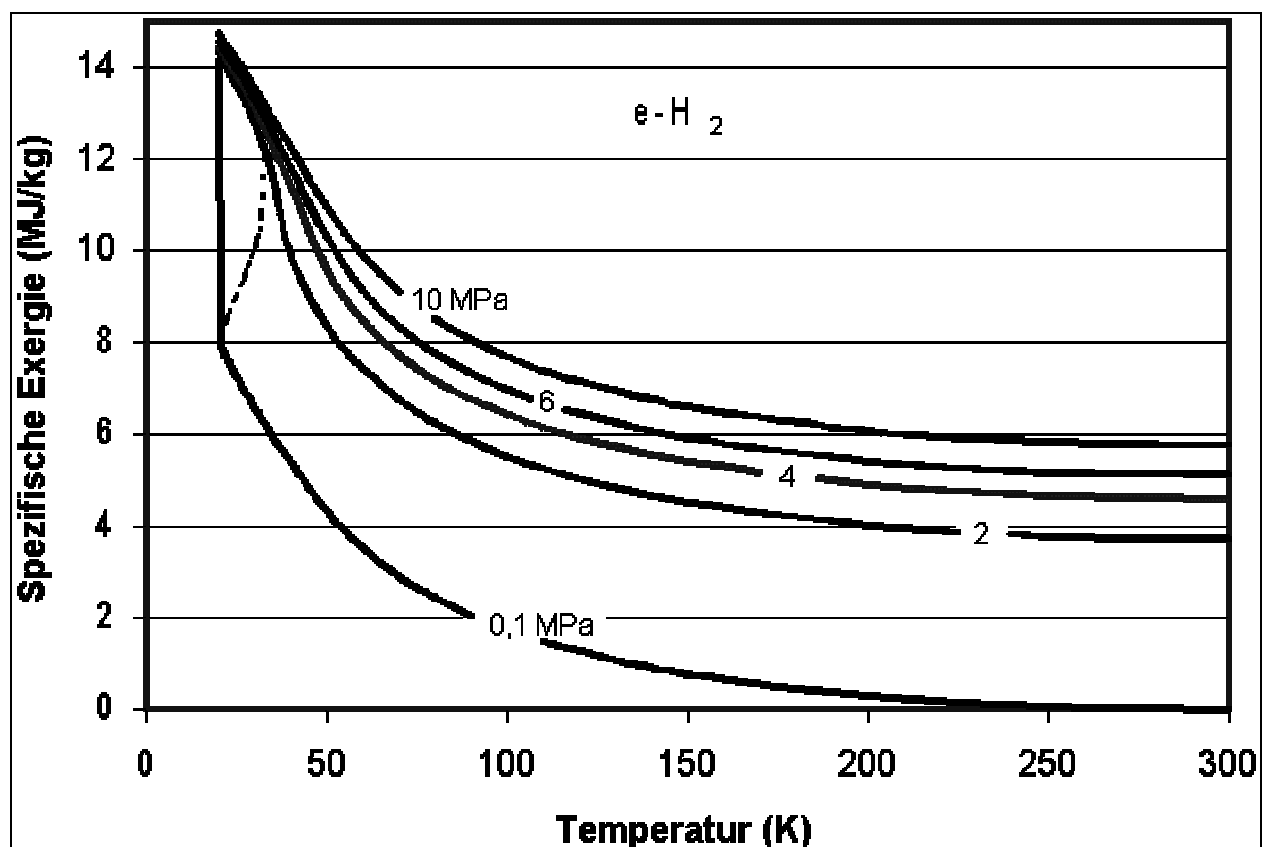


Bild 1 Spezifische Exergie von Gleichgewichtswasserstoff (e-H₂)

In Bild 1 erkennt man, dass es verschiedene Wege gibt, auf welchen man Wasserstoff verflüssigen kann, d.h. wie man von rechts unten nach links oben im Diagramm kommen kann. Auf allen diesen Wegen wird - bei reversibler Prozessführung - derselbe Energieaufwand benötigt. Man kann sich z.B. auf der

untersten Linie bewegen, d.h. das Wasserstoffgas bei 0,1 MPa abkühlen und dann bei 20,3 K verflüssigen; oder man kann das Gas zunächst bei Umgebungstemperatur auf einen hohen Druck von z.B. 10 MPa verdichten und dann bei der Abkühlung einen viel kleineren Aufwand betreiben. Man kann hier als Analogie die Bergbesteigung benutzen. Der Gipfel kann über verschiedene Wege erklommen werden, der Höhenunterschied zwischen Startpunkt und Gipfel bleibt jedoch immer derselbe.

Welchen Weg man wählt, hängt von den zur Verfügung stehenden Maschinen und Apparaten ab, ihren Kosten und den bei ihrer Verwendung auftretenden Irreversibilitäten. Intuitiv darf man annehmen, dass es sinnvoll ist, den Wasserstoff zunächst einmal bei Umgebungstemperatur zu komprimieren. Aber auf welchen Druck? Bild 2 dient zur "Routenwahl". Es zeigt die Aufteilung der "Bergbesteigung" in drei Etappen in Funktion des Druckes, auf welchen der Wasserstoff bei Umgebungsdruck verdichtet wird.

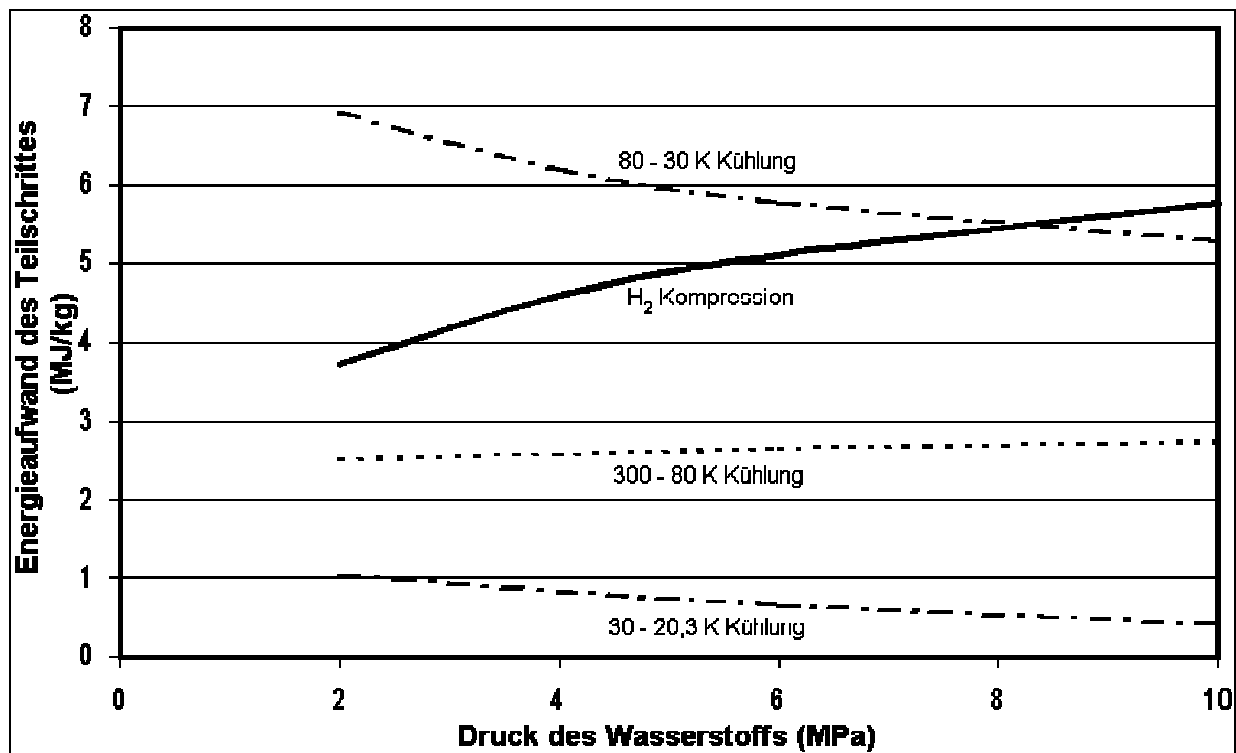


Bild 2 Energieaufwand für die Teilschritte der Verflüssigung

Die Kompression selber stellt die erste Etappe dar, die nächste ist die Kühlung des komprimierten Gases auf 80 K. Diese Stufe wurde gewählt, weil sich es sich bei 80 K um die Temperatur des flüssigen Stickstoffs handelt - ein "Basislager", welches von allen früheren "Wasserstoff-Verflüssigungs-Expeditionen" verwendet wurde. Weitere Stufen sind die Abkühlung von 80 auf 30 K bzw. von 30 auf 20,3 K, wobei zunächst offen bleibt, wie diese Stufen bewältigt werden.

Die Erkenntnis aus Bild 2 ist, dass der benötigte Aufwand für die Abkühlungs-"Etappen" von 300 auf 80 K sowie von 30 auf 20,3 K von Betrag her relativ klein sind. Außerdem ist der Energiebedarf für diese Schritte unabhängig vom Druck nach der Kompression. Die beiden Hauptetappen sind die Kompression selber sowie die

Abkühlung von 80 auf 30 K. Je höher man bei Umgebungstemperatur verdichtet, desto leichter fällt die spätere Kühlung.

Für die weiteren Prozessauslegung wurde ein Druckniveau von 8 MPa gewählt, weil dies der z.Z. höchste erlaubte Betriebsdruck für die für solche Anlagen bevorzugten Platten-Rippen-Wärmeübertrager ist und weil man in der letzten Etappe möglichst reversibel den Druck vom gewählten Hochdruck auf den Lagerdruck von 0,1 MPa absenken muss, was desto schwieriger wird, je höher der Hochdruck ist.

Für die reale Verdichtung des Wasserstoffs von 0,1 auf 8 MPa wird eine fünfstufige Kompression in einem Kolbenkompressor vorgeschlagen. Für die einzelne Kompressionsstufe ist ein isentroper Wirkungsgrad von 85% realistisch. Dies führt zu einem isothermen Wirkungsgrad für die Gesamtkompression von 71%. Wird eine zusätzliche Zwischenkühlung auf 276 K mit Hilfe einer Kaltdampfkälteanlage in Betracht gezogen, so lässt sich der Wirkungsgrad der Wasserstoffkompression sogar auf 73% steigern.

4 Wahl des Kältekreislaufes für den wichtigsten Teilprozess

Wie schon Bild 2 gezeigt hat, ist neben der Kompression die Abkühlung von 80 auf 30 K die aufwändigste Etappe. Hierfür gilt es eine effiziente und kostengünstige Lösung zu finden. In Frage kommt dabei die klassische Kaskade, wie sie schon Dewar verwendete, oder ein Kreislauf mit einem einzigen gasförmigen Kältemittel, welches in mehreren Stufen in Expandern arbeitsleistend entspannt wird. Man spricht von einem Brayton-Kreislauf, dessen einfachste Form in Bild 3 gezeigt ist. Das Kältemittel wird bei Umgebungsdruck komprimiert. Der Hochdruckstrom wird in einem Gegenstrom-Wärmeübertrager vorgekühlt und anschließend in einer Expansionsturbine arbeitsleistend entspannt. Dabei kühlt sich das Kältemittel stark ab und dient dann als Kühlmittel für den Hochdruck-Wasserstoff, bevor es wieder in den eigenen Gegenstrom-Wärmeübertrager eintritt.

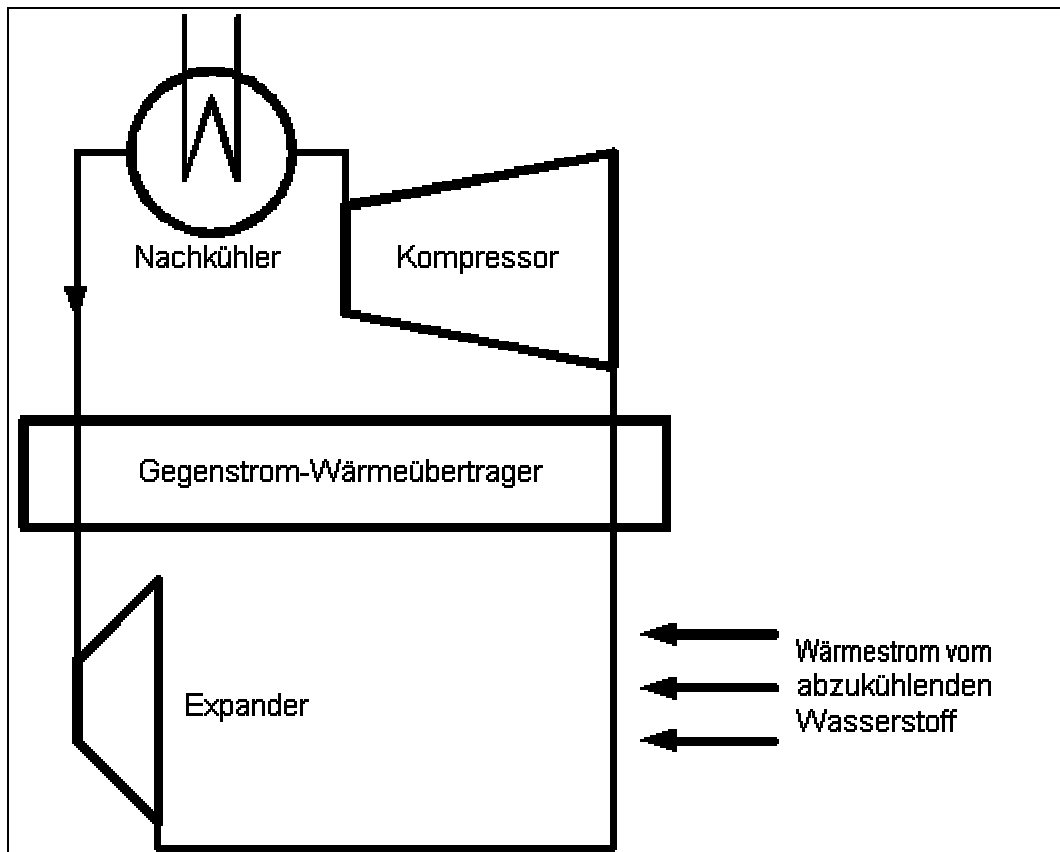


Bild 3 Fließbild eines einfachen Brayton Kreislaufes

5 Wahl des Kältemittels

Der Brayton-Kreislauf wurde auch in der Vergangenheit schon für die Verflüssigung von Wasserstoff eingesetzt. Als Kältemittel wurden Wasserstoff oder Helium gewählt. In der Literatur findet man Hinweise, dass auch Neon in Betracht gezogen wurde, aber aus diversen Gründen nicht zum Einsatz kam.

Der Wirkungsgrad des idealen Brayton-Prozesses hängt im Prinzip nicht von der Wahl des Kältemittels ab. In der Realität ist der Brayton-Prozess desto effizienter, je besser die verwendeten Komponenten Kompressor, Wärmeübertrager und Expander in thermodynamischer und mechanischer Hinsicht mit dem gewählten Kältemittel harmonieren.

Beim Kompressor können die besten Wirkungsgrade erreicht werden, wenn man einen Turbokompressor verwendet. Allerdings lassen sich Wasserstoff und Helium nicht wirtschaftlich mit Turbokompressoren verdichten. Als Alternative käme deshalb Neon in Frage. Neon hat jedoch den Nachteil, dass sein Siedepunkt (27,2 K) etwas über dem des Wasserstoffs (20,3 K) liegt, so dass die Gefahr besteht, dass es im Austritt des letzten Expanders zu Kondensationseffekten kommt. Ein weiterer Nachteil sind die schlechten Wärmeübertragungseigenschaften (niedrige Wärmeleitfähigkeit, hohe Viskosität) des Neons im Vergleich mit Wasserstoff oder Helium.

Als Kompromiss wird nun vorgeschlagen, ein Gemisch aus Helium und Neon als Kältemittel zu verwenden. Das Neon dient zur Anpassung an die Bedürfnisse des Turbokompressors. Das Helium dagegen verhindert die Kondensation in der letzten

Stufe der Expansion und verbessert den Wärmeübergang. Günstig scheint eine Mischung aus 80% Helium und 20% Neon zu sein. Dies ergibt ein Gasgemisch mit einer Molmasse von 7,2 kg/kmol. Mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 470 m/s lässt sich im Turbokompressor ein Druckverhältnis (Austrittsdruck/Eintrittsdruck) von etwa 1,4 pro Stufe erreichen.

Legt man den Prozess vom kalten Ende her aus, d.h. nimmt man für den letzten Expander eine Austrittstemperatur von 24,7 K an, so erreicht man mit einem einfachen Brayton-Kreislauf eine Abkühlung des Wasserstoffs von etwa 60 auf 25 K. Für den höheren Temperaturbereich hat man die Wahl, auf das Kältemittel Stickstoff zurückzugreifen oder mit dem Helium-Neon-Gemisch fortzufahren. Diese zweite Variante hat den Vorteil, dass man nur einen einzigen Turboverdichter benötigt mit entsprechend höherem Wirkungsgrad. Man arbeitet also mit zwei parallelen, auf verschiedenen Temperaturniveaus arbeitenden Brayton-Kreisläufen. Der untere hat zwei Expander in Serie, der obere deren vier. Die sechs Expander geben ihre Leistung an direkt gekoppelte einstufige Turbokompressoren ab, die in Serie mit dem Hauptkompressor angeordnet sind. Dieser achtstufige Hauptverdichter liefert ein Druckverhältnis von 18. Die sechs Bremsverdichter der Turboexpander erhöhen das Gesamtdruckverhältnis auf etwa 24.

Für die einzelnen Verdichterstufen ist beim heutigen Stand der Verdichtertechnik ein isentroper Wirkungsgrad von 85% realistisch. Für die total 14 Stufen mit jeweils Zwischenkühlung mit Kühlwasser ergibt sich ein isothermer Wirkungsgrad von 76%.

6 Das Gesamtließbild

Neben der oben erwähnten Wasserstoff-Kompression mit doppelter Zwischenkühlung und den zwei Brayton-Kreisläufen enthält die hier vorgeschlagene Anlage noch einige weitere Besonderheiten, die aus dem Gesamtließbild (Bild 4) ersichtlich sind:

- Eine dreistufige Propan-Kaltdampf-Kältemaschine zur Zwischenkühlung bei der Wasserstoff-Kompression und zur Vorkühlung des komprimierten Wasserstoffs auf 220 K
- Eine kontinuierliche ortho-zu-para-Umwandlung im Gegenstrom-Wärmeübertrager, wobei der Katalysator für die Umwandlung in die entsprechenden Kanäle der Plattenaustauscher eingefüllt wird
- Eine Kolbenexpansionsmaschine zur arbeitsleistenden Entspannung des auf 25 K vorgekühlten Hochdruckwasserstoffes von 8 auf 0,1 MPa
- Ein kalter Kompressor zur kalten Verdichtung des kleinen Dampfstromes, der sich beim Austritt des Wasserstoffes aus der Kolbenexpansionsmaschine bildet.

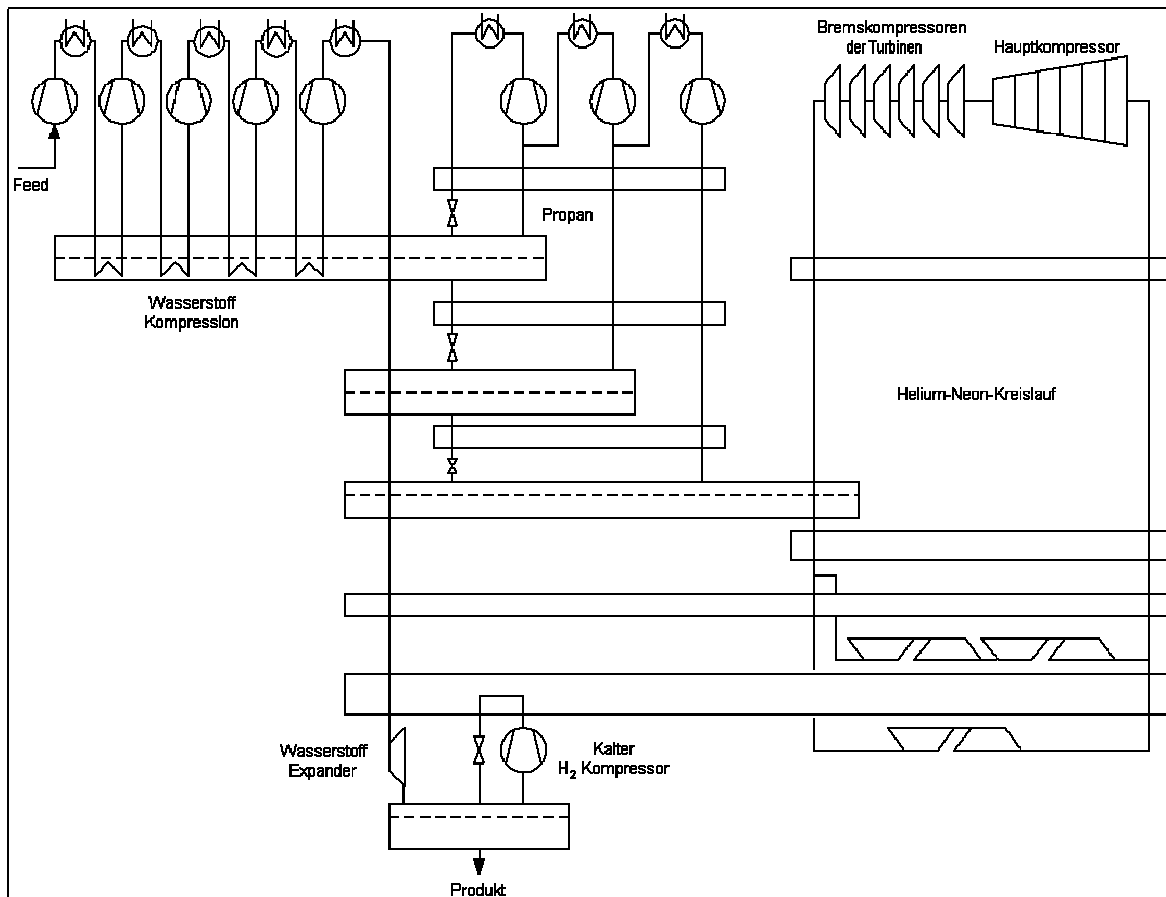


Bild 4 Fließbild der Gesamtanlage

7 Resultierender Energiebedarf

In der Gesamtbilanz ergeben sich die in Tab. 1 gezeigten Leistungsdaten, jeweils bezogen auf eine Produktmenge von 1 kg flüssigen Wasserstoff. Es ergibt sich ein Energiebedarf von 23,4 MJ/kg (6,5 kWh/kg). Vergleicht man dies mit dem minimalen Energieaufwand von 14,2 MJ/kg, so ergibt dies einen Wirkungsgrad der Gesamtanlage von 60%. Damit liegt man deutlich über dem, was in bisher gebauten Anlagen realisiert wurde.

Tabelle 2
Energiebedarf mit der vorgeschlagenen Anlage

	Wellenleistung kJ/kg H ₂	Motorwirkungsgrad	Energieverbrauch in kJ/kg H ₂	Energieverbrauch in kWh/kg
Wasserstoff Kompression	6846	0,96	7131	
Propan Kompressor	627	0,96	653	
He-Ne-Kompressor	15019	0,96	15645	
H ₂ Expander	-93	0,80	-75	
Kalter H ₂ Kompressor	27	0,80	34	
Summe	22427		23389	6,5

Exergie			14200	3,95
Gesamtwirkungsgrad			60%	60%

Als Ergebnis der reinen Prozessauslegung erhält man einen Wert von 6,5 kWh/kg. Da aber solche Anlagen noch eine Anzahl von Nebenverbrauchern haben wie Wasserpumpen und Kühlturmgebläse, wird als Richtwert für zukünftige Studien der Wasserstoff-Energiewirtschaft ein Energiebedarf für die Verflüssigung von 7 kWh/kg empfohlen.

Dieser Wert lässt sich noch verringern, wenn der Ausgangswasserstoff (Feed) bei erhöhtem Druck vorliegt, d.h. wenn er z.B. von einer Druckelektrolyse oder einem Dampfreformer kommt. Weniger Antriebsenergie wird auch benötigt, wenn der Druck des produzierten flüssigen Wasserstoffs höher als 0,1 MPa sein darf. Bild 5 zeigt die Abhängigkeit des Energiebedarfs vom Druck des Ausgangswasserstoffs und dem Druck des Produktes.

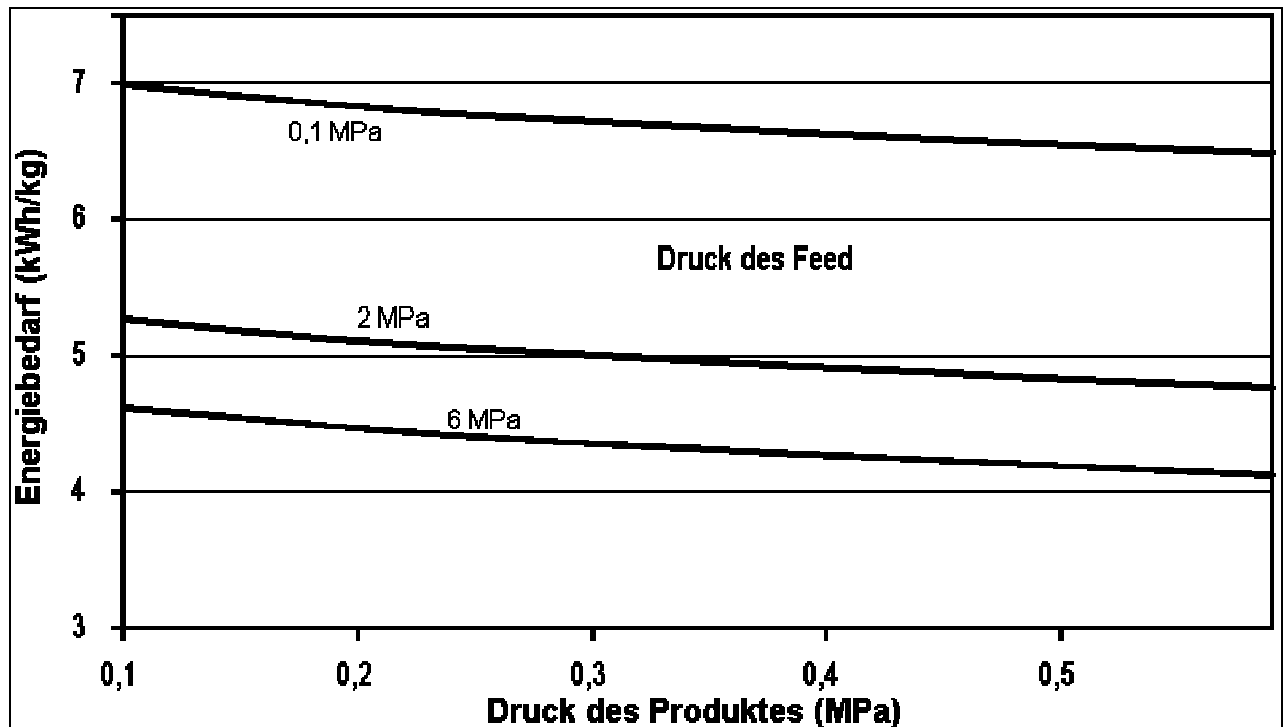


Bild 5 Energiebedarf in Funktion des Drucks von Feed und Produkt

In den Energiebedarf der Verflüssigung sollte man auch den Antrieb der Kompressoren der Kälteanlage mit einbeziehen. Bei der vorangegangenen Prozessberechnung wurde angenommen, dass die Kompressoren von Elektromotoren angetrieben werden, für welche bei der Größe der Anlage ein Wirkungsgrad von 96% realistisch ist. Wird jedoch der Wasserstoff aus Erdöl oder Erdgas gewonnen, steht also der Verflüssiger in einer petrochemischen Anlage, so ist es sicher sinnvoller, die Turbokompressoren mit Gas- oder Dampfturbinen anzutreiben, den Wasserstoff-Kolbenkompressor dagegen mit einem Gas- oder Dieselmotor. Kommt der Wasserstoff aus einer Elektrolyse, die ihren Strom aus einem Wasserkraftwerk bezieht, sollte man untersuchen, ob die Kompressoren nicht direkt von einer Wasserturbine angetrieben werden können.

Durch systematisches Vorgehen ist es hiermit gelungen, den Energiebedarf für die Verflüssigung von Wasserstoff im Vergleich mit bisher bekannten Prozessen deutlich zu verringern. Der wichtigste Schritt dabei war die Wahl des Helium-Neon Gemisches als Kältemittel. Neon gilt allgemein als teurer Stoff. Da aber das Kältemittel in der Anlage immer gasförmig bleibt, ist das benötigte Gasinventar sehr klein. Außerdem sollte es möglich sein, die Leckagen in den verwendeten Maschinen zu minimieren. Ansonsten gibt es für alle vorgesehenen Maschinen und Apparate schon Referenzen. Die Anlagenkosten dürften nicht höher liegen als in bisher gebauten Anlagen.

Falls sich also die Wasserstoff-Energietechnik in großem Stil durchsetzt, steht dafür eine effiziente Verflüssigungstechnologie zur Verfügung.

Literatur

- [1] Bünger, U.; Kesten, M.; Wolf, J.:
Stand und Perspektiven der Kryotechnik im Einsatz für Kraftfahrzeuge in Europa,
DKV-Jahrestagung 1997, Hamburg, S. 63-74
- [2] Wetzel, F.-J.:
Improved handling of liquid hydrogen at filling stations: Review of six years
experience,
Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 5, pp. 339-348, 1998
- [3] Quack, H.:
Geschichte und Technologie der Wasserstoff-Verflüssigung
DKV-Jahrestagung 1998, Würzburg, S. 55-68
- [4] Kinnard, G.:
The commercial use of liquid hydrogen over the last 40 years,
ICEC 17, IoP Publ. 1998, pp. 39-44

 [zurück](#)

Weitere Informationen unter:
kkt@memkn1.mw.tu-dresden.de
