

Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft  
und Gesellschaft

Hartmut Frey · Kay Golze ·  
Michael Hirscher · Michael Felderhoff

# Energieträger Wasserstoff

---

# **Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft**

Die Frage nach der Energieversorgung ist entscheidend dafür, wie sich die Zukunft gestaltet – sowohl was technische Entwicklungsarbeit betrifft als auch wirtschaftliche Konzepte oder einen gesellschaftlichen Wandel. Je nach räumlicher Betrachtungsebene (global, national oder regional) stehen unterschiedliche Fragestellungen, Sichtweisen oder Herausforderungen im Vordergrund.

Die Titel dieser Buchreihe wollen somit auf neue Perspektiven aufmerksam machen, und in interdisziplinärer Weise Facetten rund um die Energieerzeugung, -nutzung, -verteilung, -wirtschaft und Wirtschaftlichkeit sowie zur Bedeutung für Umwelt und Gesellschaft beleuchten.

Um dies zu erreichen, bearbeiten in der Reihe *Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft* Autoren aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zusammen ein Thema und entzünden gemeinsam eine Diskussion zu energiespezifischen Fragestellungen aus mehreren Blickwinkeln.

---

Hartmut Frey · Kay Golze · Michael Hirscher ·  
Michael Felderhoff

# Energieträger Wasserstoff

Hartmut Frey  
Esslingen am Neckar, Deutschland

Kay Golze  
Berlin, Deutschland

Michael Hirscher  
Stuttgart, Deutschland

Michael Felderhoff  
Essen, Deutschland

ISSN 2366-6242 ISSN 2366-6250 (electronic)  
Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft  
ISBN 978-3-658-40966-1 ISBN 978-3-658-40967-8 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-40967-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Dr. D. Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

## Vorwort

Heutzutage gibt jeder Arbeitnehmer im Prinzip zwei Drittel seines Gehalts für Energie in irgendeiner Form aus. Und zwar nicht nur für Heizungs-, Beleuchtungs- oder Benzinkosten, sondern auch für die auf indirekte Weise entstehenden Energiekosten. Beim Bau eines Hauses etwa machen die Energiekosten den größten Anteil aus. Die Herstellung und der Transport des Baumaterials sind sehr energieaufwendig, hinzu kommen Dachpfannen, Ziegelsteine und Zement. Aber auch beim Gemüsehändler oder Bäcker muss man für Energie bezahlen, die betriebsbedingt verbraucht wird. Zählt man alles zusammen besteht die Hälfte einer Kinokarte aus Kosten für Energie. Auch im Urlaub oder im Bereich der Bildung entfällt der größte Teil der Kosten auf Energie.

Energie spielt auch für die Produktion von Nahrungsmitteln, für die sich nach wie vor vermehrende Erdbevölkerung, u.a. durch den Einsatz künstlicher Düngemittel, eine zunehmende Rolle. Neben der Herstellung von Düngemitteln benötigt man auch für die Erzeugung von Pestiziden und Herbiziden Energie. Hinzu kommt der steigende Energieverbrauch zur Rohstoffgewinnung und die Umsetzung in technische Systeme. Und jede Energie, wie auch immer erzeugt, degeneriert letztlich zu Wärme (2. Hauptsatz der Thermodynamik).

Noch immer verstehen die Menschen ziemlich wenig von sich selbst und ihren eigenen Interessen, die sie so leichtfertig „anthropozentrisch“ nennen, sodass der CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre, das Verseuchen der Meere, die schonungslose Plünderung aller Ressourcen und die massive Verdrängung anderer Arten und Lebensräume, in Konsequenz ein epochales globales Artensterben, tatsächlich „anthropozentrisch“ auf das Wohl und die Zukunft der Menschheit hin ausgerichtet ist. Dieses Verhalten einer global agierenden Spezies, die sich in ihrem unbewussten und ungezügelten Vermehrungszwang sich ihren eigenen archaischen Anpassungsmechanismen an sich ändernde Naturphänomene beraubt, kann nur als kollektiv unintelligentes Verhalten bezeichnet werden.

Eine überwältigende Sorge um ökologische Gewissheiten, eine ebenso unwiderstehliche Täuschungserwartung in Kombination mit dem Hang zur Bequemlichkeit treiben einerseits die Bereitschaft an, die ökologischen Erkenntnisse zu akzeptieren und andererseits dem Prinzip „nach mir die Sintflut“ zu huldigen. Aufklärung über den nachhaltigen Umgang mit der Natur und ihren Ressourcen ist konfrontiert mit Misstrauen

gegenüber der Reduzierung des Konsums und dessen Förderern, aus welchen Gründen auch immer. Rationalismus und Misstrauen sind verschwisterte Impulse, beide eng mit der gesellschaftlichen Entwicklung verknüpft.

Für die Versorgung der Menschen im kommenden Jahrhundert mit Energie wird das Konzept der Nachhaltigkeit enorme Auswirkungen haben, gilt es doch, den stetig zunehmenden Verbrauch fossiler Energieträger mit den zahlreichen negativen Folgen für Mensch und Umwelt in den Griff zu bekommen. Dass die Menschheit von einer nachhaltigen Energiezukunft immer noch weit entfernt ist, verdeutlichen die Energieszenarien, welche eine dramatische Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zeigen.

Durch den nach wie vor weltweit steigenden Verbrauch an fossiler Energie erhöht sich der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Luft, sodass diese mehr Sonnenlicht (Anmerkung KG: Die niederfrequenten infraroten Wärmestrahlen der Erdoberfläche, Gebäude, Steine etc. werden von dem CO<sub>2</sub> reflektiert und können deshalb nicht als Wärmestrahlung in den Weltraum abgegeben werden) verschlucken kann. Das wiederum führt zur sogenannten Rayleigh-Bénard-Instabilität<sup>1,2</sup> die durch extreme Wetterschwankungen verursacht wird.

Mit der Folge, dass schnelle Erwärmung und Abkühlung direkt aufeinander folgen. Menschen können sich solchen Temperaturschwankungen nur unter Schwierigkeiten anpassen. Dies ist der Grund dafür, dass beim Durchzug einer Wetterfront mit extremen Temperaturschwankungen die Sterberate ansteigt. Das globale Nachhaltigkeitsproblem, d.h. der Umgang mit der Natur entwickelt sich zu einem psycho-ökonomischen Problem, basierend auf der Genesis mit der Aufforderung „macht euch die Erde untertan und mehret euch und der gesellschaftlichen Tradition „Macht bedeutet Kompromisse“ eingehen.

So lange der „Klimawandel“ als Einheit verstanden wird und nicht das Naturphänomen vom Gesellschaftsphänomen Klimawandel getrennt wird, kann man der eigenen Irrationalität nicht entfliehen.

Prognosen, insbesondere nach der negativen Seite, sind schon jetzt sichtbar. Fraglich ist, ob auch nur die jetzigen 8 Milliarden Menschen ohne verhängnisvolle dauernde Umweltschäden annähernd im Stile der Industrieländer, d.h. mit dem per capita Energieverbrauch der jetzigen europäisch-amerikanischen Welt leben könnten. Doch realistisch ist allerdings gar nicht diese Größe, für welche die Frage zu stellen ist, sondern diese muss der Stand sein, auf dem sich demographisch frühestens die Weltbevölkerung – *mit friedlichen Mitteln* – stabilisieren, d.h. auf Nullvermehrung bringen ließe; und das wäre etwa das Zweifache der jetzigen am Ende der nächsten ein bis zwei Generationen. Bereits im Jahre 1987 verwies die Brundtland-Kommission in ihrem Bericht „Our Common Future“ auf die Grenzen der wirtschaftlichen Entwicklung bei unverändert hohem Energie- und Umweltverbrauch. In ihrem Bericht an die UNO machte die Kommission deutlich darauf aufmerksam, dass es bei begrenzt verfügbaren Ressourcen kein

---

<sup>1</sup> [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_1749.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1749.html) (April 2011).

<sup>2</sup> <https://www.uni-muenster.de/Physik.GP/Geodynamik/Forschung/SimulationenMantelkonvektion.html> (April 2011).

unbegrenzt wirtschaftliches, am Bruttoinlandsprodukt gemessenes Wachstum geben kann.

Dass die Menschheit von einer nachhaltigen Energiezukunft immer noch weit entfernt ist, zeigen nicht zuletzt die unzähligen Energieszenarien, welche eine dramatische Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und eine damit einhergehende Klimaerwärmung prognostizieren.

Aus den unterschiedlichsten Energieszenarien geht eindeutig hervor, dass in den nächsten einhundert Jahren kein Abweichen vom gegenwärtigen Trend zunehmenden Energieverbrauchs und steigender CO<sub>2</sub>-Emission zu rechnen ist.

Die große Variation der Resultate ergibt sich aus unterschiedlichen Annahmen bzgl. Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, technischem Fortschritt, atmosphärische Chemie und ähnlichem. Trotz dieses Umstandes spiegeln alle Modelle denselben Trend wieder und unterstreichen, dass die Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung nur durch eine grundlegende Änderung unseres Energieversorgungssystems möglich ist. Die Dekarbonisierung der (Energie)-Wirtschaft zählt zu den größten Herausforderungen unserer Zeit. Lokale, dezentrale Energiesysteme und der Ausbau regenerativer Energieerzeugung sind Meilensteine auf dem Weg in eine dekarbonisierte Zukunft. Als Schlüsselement eines nachhaltigen Energiesystems wird grüner Wasserstoff als Energieträger und Speichermedium immer wichtiger. Er leistet für industrielle Prozesse und Mobilitätslösungen gleichermaßen einen wichtigen Beitrag zur Energiewende.

Ein genauer Blick auf die Klima- und Energieszenarien der regenerativen Energieerzeugung zeigt jedoch auch kritische Aspekte. Wenn die Emissionszahlen die ökologische Wahrheit sagen sollen, muss auch bei der Windenergie der Energieeinsatz entlang der Prozesskette, d.h. bei der Fertigung, der Wartung und dem Recycling berücksichtigt werden. Ähnliches gilt für alle Solarenergie-Technologien (Solarkraftwerke, PV-Anlagen, etc.) und die etablierte Wasserkraft, die Milliarden Tonnen Beton, Stahl und andere Werkstoffe verarbeitet, die allesamt enorme Landschaftsflächen verbrauchen. Das bekannte DESERTEC-Projekt, in dem große unbewohnte Wüstengebiete zur Stromerzeugung genutzt worden wären, scheiterte und scheitert bis heute an politischen Partikularinteressen, sowie ungelösten Sicherheitsfragen in der Abhängigkeit von den Staaten, die aus diesen Gebieten Energie bezogen hätten.

Betrachtet man einen Druckwasseratomreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1 GW<sub>el</sub>, einer jährlichen Betriebszeit unter Volllast von 80%, so liefert der Reaktor 800 MW<sub>el</sub>. Zur Kompensation dieser Leistung sind ca. 200 Windturbinen mit einer heutigen Durchschnittsleistung von ca. 4 MW (3,6 MW Stand 2021), ca. 150 Meter Höhe und ca. 120 m Flügeldurchmesser, auf einer Fläche von ca. 11 x 11 km erforderlich und zwar unter der Annahme, dass die Anlagen jährlich zu 35% Strom ins Netz einspeisen, real heute jedoch maximal 22% über das Jahr erreicht werden. Als Kriterium dafür dient die Energierückführung, d.h. die Zeit, bis der Energieaufwand zur Herstellung einer Anlage durch deren Betrieb wieder kompensiert ist.



Analysiert man die „Energiewende“ global, stellt sich automatisch die Frage „wer soll das, bei einer weiterwachsenden Weltbevölkerung, finanzieren“? Nach Meinung der Politiker in den Entwicklungs- und Schwellenländer sind dafür die Industriestaaten in der Pflicht, denn diese haben anhand des technischen Fortschritts die Explosion der Menschheit verursacht, und sind damit auch für die zunehmenden CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesen Ländern verantwortlich. Mit der Konsequenz, dass die Industriestaaten CO<sub>2</sub> neutrale Technologie aus den Industriestaaten zur Verfügung stellen müssen, um den Anstieg von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre zu begrenzen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Chemisches Element Wasserstoff</b>	<b>1</b>
1.1	Charakteristika des Wasserstoffs	1
1.2	Herstellungsverfahren	2
1.2.1	Elektrolysemethoden	2
1.2.2	Thermochemische Kreisprozesse	34
1.2.3	Offene thermochemische Methoden zur Wasserstofferzeugung	38
1.2.4	Dampfreformierung	39
1.2.5	Kværner-Verfahren	46
1.2.6	Ammoniak-Synthese	46
1.3	Wasserstoffspeicherung in Feststoffen	49
1.3.1	Physisorption in porösen Materialien	49
1.3.2	Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden	65
1.4	Verflüssigung von Wasserstoff	76
1.4.1	Ortho-Para-Umwandlung	76
<b>2</b>	<b>Großflächige nachhaltige Energieerzeugung zur Produktion des Energieträgers Wasserstoffs</b>	<b>83</b>
2.1	Solarenergie	83
2.2	Solarthermie	83
2.2.1	Solarturmkraftwerke	84
2.2.2	Solarfarmkraftwerke	86
2.3	Photovoltaik	89
2.3.1	Perspektiven	89
2.3.2	Energieertrag einer Photovoltaikanlage	91
2.3.3	Verschmutzung und Reinigung	92
2.3.4	Erntefaktor	93
2.4	Windenergie	95
2.4.1	Konzeption von Windkraftanlagen	97
2.5	Stromgestehungskosten	100
2.6	Stromtransport	102

2.6.1	Hochspannungsgleichstromkabel .....	102
2.6.2	Vor- und Nachteile der Hochspannungs-Gleichstromübertragung .....	104
2.6.3	Supraleitende Kabel .....	107
2.7	Wasserstofferzeugung durch Hochtemperaturkernreaktoren .....	113
<b>3</b>	<b>Wasserstoffspeicher und ihre Anwendung .....</b>	<b>119</b>
3.1	Überblick .....	119
3.1.1	Energieversorgung mit Wasserstoff .....	121
3.1.2	Wie sicher ist die Nutzung von Wasserstoff? .....	122
3.2	Speichertechnologien für Wasserstoff .....	125
3.2.1	Gasförmige Wasserstoffspeicherung (GH <sub>2</sub> ) .....	128
3.2.2	Flüssige Wasserstoffspeicherung (LH <sub>2</sub> ) .....	130
3.2.3	Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden und Metal-Organic Frameworks (MOFs) .....	131
3.2.4	Wasserstoffspeicherung mittels Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) .....	132
3.2.5	Chemisch gebundener Wasserstoff .....	132
3.2.6	Glasspeicher .....	134
3.2.7	Nanotubes .....	134
3.3	Einsatz von Wasserstoffspeichern .....	135
3.3.1	Wasserstoffspeicher für gasförmigen Wasserstoff .....	136
3.3.2	Wasserstoffspeicher für flüssigen Wasserstoff .....	142
3.3.3	Wasserstoffspeicher auf Basis von flüssigen Trägerstoffen (LOHC) .....	142
3.4	Märkte für Wasserstoffspeicher .....	143
3.5	Die Bedeutung von Wasserstoff im Energiesystem .....	146
3.5.1	Speichersystem Power-To-Gas .....	148
3.5.2	Power-To-Gas als Element der elektrischen Energieversorgung .....	150
3.5.3	Das Verfahren Power-to-Gas als Produkt .....	154
3.6	Technische Systeme zur Wasserstoffnutzung in einem Energiesystem ...	157
3.6.1	Systemkomponenten eines wasserstoffbasierten Energiesystems .....	158
3.6.2	Die Wasserstofferzeugungssysteme .....	159
3.6.3	Anforderungen an Elektrolyseanlagen .....	163
3.6.4	Wasserstoffspeicherung .....	166
3.7	Wasserstoff als Energieträger für kleine Siedlungen .....	167
3.7.1	Das Szenario als Planungsgrundlage .....	170
3.7.2	Die Gebietsanalyse .....	172
3.7.3	Funktionselemente einer Wasserstoffversorgung .....	173
3.7.4	Dynamische Energiespeicher zur Versorgungsglättung .....	179
3.7.5	Funktionseinheit Speichersystem POP .....	180

---

3.7.6	Funktionseinheit Virtuelle Pipeline .....	181
3.7.7	Disposition der Energieversorgung .....	183
3.7.8	Simulation von kleinen Wohnsiedlungen .....	187
<b>4</b>	<b>Wasserstoffnutzung in Gebäuden .....</b>	<b>197</b>
4.1	Gebäudeausführung .....	199
4.1.1	Behaglichkeitskriterium Temperatur und Feuchtigkeit .....	200
4.2	Solarenergienutzung durch optimale Gebäudegestaltung .....	201
4.3	Wärmespeichersysteme .....	202
4.4	Wasserstoffnutzung und -speicherung .....	202
<b>5</b>	<b>Kritische Betrachtung der Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Nutzung des Energieträgers Wasserstoff .....</b>	<b>205</b>



## 1.1 Charakteristika des Wasserstoffs

Wasserstoff zeichnet sich gegenüber anderen Gasen durch eine Reihe ungewöhnlicher Eigenschaften aus. So ist er das mit Abstand leichteste Element. Auch im flüssigen Zustand ist die Dichte klein ( $\rho = 0,071 \text{ kg/l}$ ).  $\text{H}_2$  diffundiert 5-mal schneller durch Trennwände als Stickstoff. Nur He hat eine niedrigere Siedetemperatur als  $\text{H}_2$ , wie das *T,s-Diagramm* nach Abb. 1.1a, b zeigt.

Weitere physikalische Daten sind aus den Diagrammen Abb. 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 und 1.10 ersichtlich<sup>3</sup>.

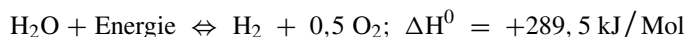
Wasserstoff wird nach Farben<sup>1</sup> unterteilt, gemäß dem Herstellungsverfahren:

<b>Grauer Wasserstoff</b>	Herkömmliche Verfahren, wie die Dampfreformierung spalten meist Erdgas (Methan) unter Hitze in Wasserstoff und $\text{CO}_2$ . Das entstehende $\text{CO}_2$ , etwa 10 t je Tonne Wasserstoff, gelangt dabei ungenutzt in die Atmosphäre
<b>Blauer Wasserstoff</b>	Es handelt sich um herkömmlich erzeugten Wasserstoff, aber das entstehende $\text{CO}_2$ wird gebunden und nicht in die Atmosphäre abgegeben
<b>Türkiser Wasserstoff</b>	Durch thermische Methanspaltung erzeugter Wasserstoff heißt „türkis“, wenn fester Kohlenstoff anstatt $\text{CO}_2$ anfällt, die thermische Energie aus erneuerbaren Energiequellen stammt und der Kohlenstoff dauerhaft nicht verbrannt wird
<b>Grüner Wasserstoff</b>	Dieser wird unter Nutzung regenerativ erzeugten Stroms durch Elektrolyse gewonnen
<b>Roter Wasserstoff</b>	Der zur Wasserstoffherstellung aufgewandte elektrische Strom stammt aus Kernenergie

<sup>1</sup> *Wasserstoff Farbenlehre*. In: *solarify.eu*. 18. März 2020,

<b>Gelber Wasserstoff</b>	Die Herstellung erfolgt durch Elektrolyse aus dem Stromnetz (aktueller Strommix)
<b>Weißer Wasserstoff</b>	Entsteht aus chemischen Prozessen, deren primäres Ziel nicht die Wasserstoffproduktion ist

Alle Verfahren zur Wasserstofferzeugung beruhen dabei, direkt oder mittels zusätzlicher Reaktionsschritte, auf der Grundgleichung der Wasserspaltung:



Die Reaktionsenthalpie  $H^0$  legt fest, dass für die Herstellung von 1 g Wasserstoff ein Energieaufwand von mindestens 145 kJ erforderlich ist. Diese Energie kann chemisch, thermisch, elektrisch oder durch Strahlung induziert sein.

---

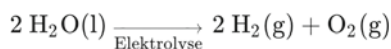
## 1.2 Herstellungsverfahren

### 1.2.1 Elektrolysemethoden

Am einfachsten lässt sich Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) spalten: Durch Anlegen einer *Gleichspannung* an zwei Elektroden, die in einen Elektrolyten eintauchen, Abb. 1.11.

\*( $S^0$  Werte:  $\text{H}_2(\text{g}) = 131,0$ ;  $\text{O}_2(\text{g}) = 205,0$ ;  $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) = 69,9$ ;  $\text{H}_2\text{O}(\text{g}) = 188,7 \text{ J/K mol}$ )

Das Gesamtreaktionsschema der Redoxreaktion bei der Wasserelektrolyse ist:

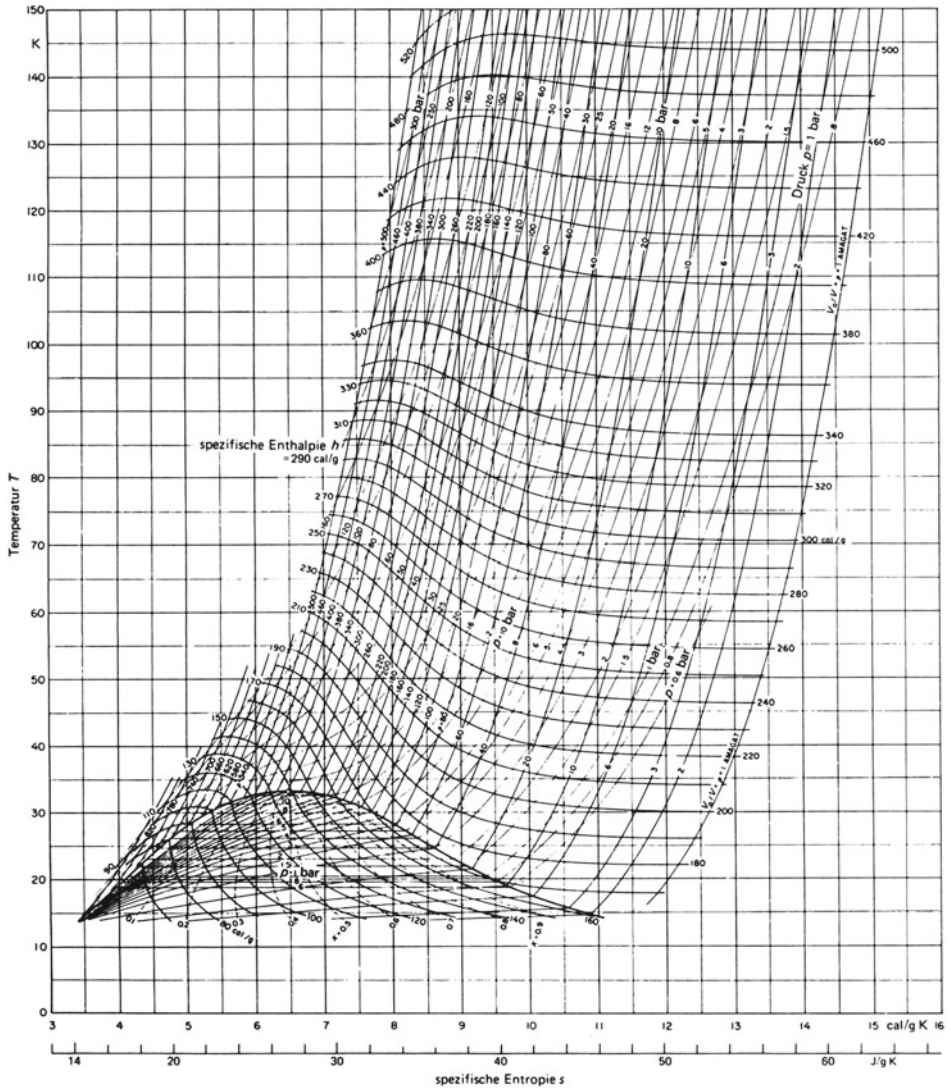


$$\Delta G = +474,48 \text{ kJ/2mol} = +237,24 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S = +371,2 \text{ J/K 2mol} = +163,6 \text{ J/K mol}$$

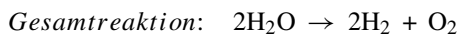
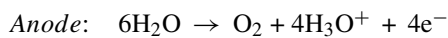
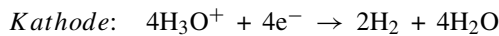
$$\Delta H = +571,66 \text{ kJ/2 mol} = +285,83 \text{ kJ/mol}$$

Die Elektroden tauchen in einen wässrigen Elektrolyten ein, der meist aus einem Säurezusatz, wie Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), oder dem Zusatz einer Lauge, wie Kalilauge ( $\text{KOH}$ ) besteht. Die Elektrolyse gelingt auch, wenn neutrale Salze wie Natriumsulfat als Elektrolyt verwendet werden. Ungeeignet sind beispielsweise Salzsäure oder Natriumchlorid, da Chlor an der Anode gebildet wird.



**Abb. 1.1** T,s-Diagramm für Wasserstoff, 0 bis 150 K (Dichte  $\rho: 1 \text{ amagat} = 8,9886 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ )<sup>2</sup>

In saurer Lösung:



<sup>2</sup> Frey, H. und R. A, Haefer, Tieftemperaturtechnologie, VDI-Verlag 1961.

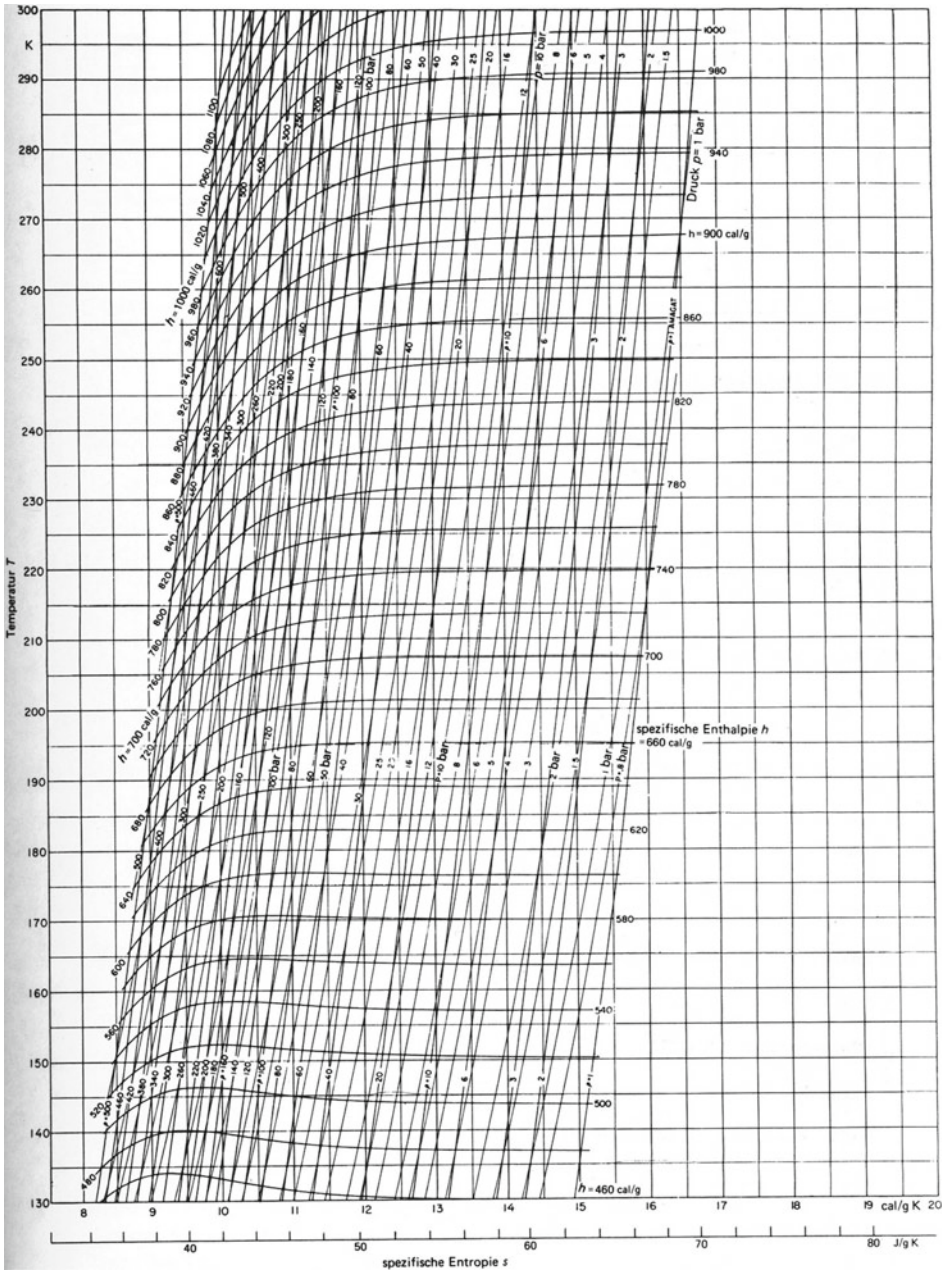
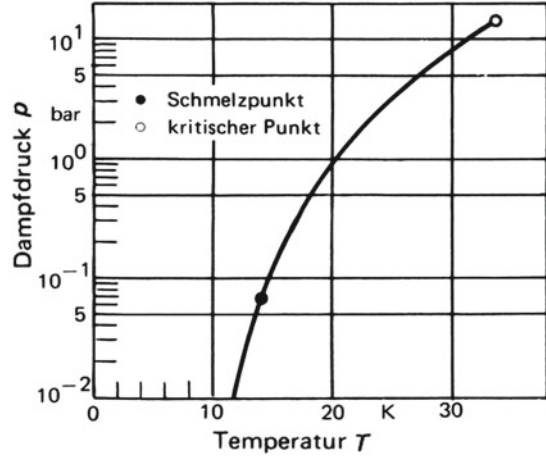


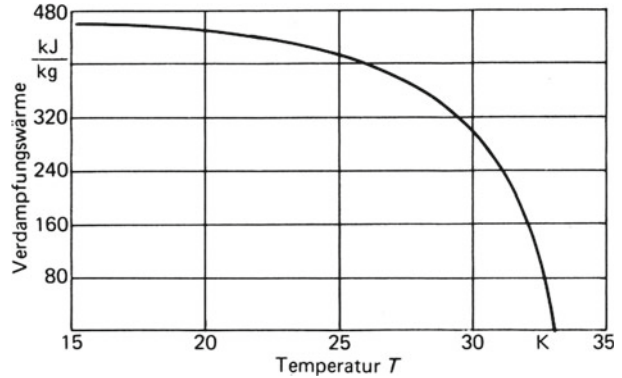
Abb. 1.2 T,s-Diagramm für Wasserstoff, 130 bis 300 K (Dichte  $\rho$ : 1 amagat =  $8,9886 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ )



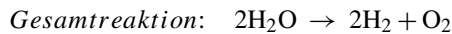
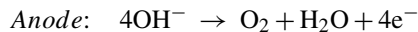
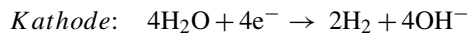
**Abb. 1.3** Dampfdruckkurve von Wasserstoff



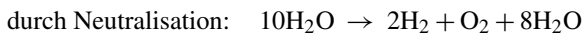
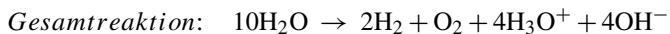
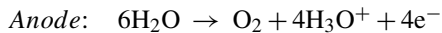
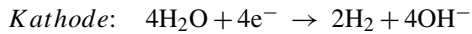
**Abb. 1.4**  
Verdampfungswärme von flüssigem Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur



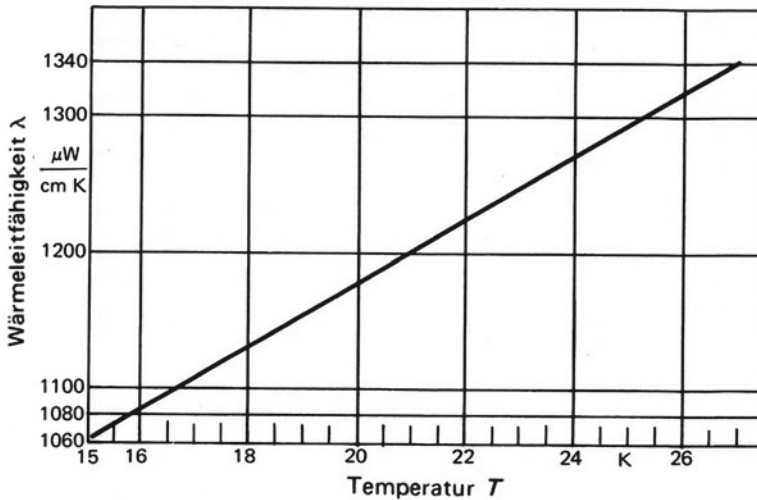
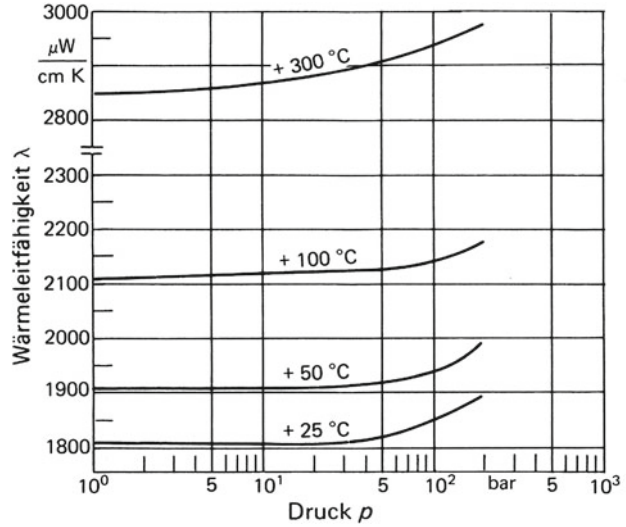
In alkalischer Lösung:



In Natriumsulfat-Lösung:

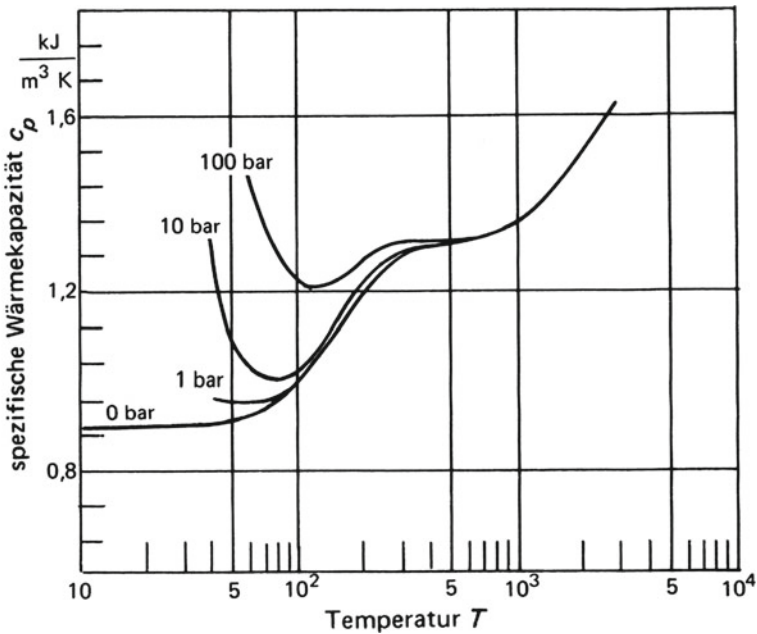


**Abb. 1.5** Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff in Abhängigkeit vom Druck



**Abb. 1.6** Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasserstoff (beim Sättigungsdampfdruck) in Abhängigkeit von der Temperatur

Zwischen den Halbzellen bilden sich Konzentrationsgradienten im Elektrolyten, da je nach den Bedingungen Oxonium-Ionen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) oder Hydroxid-Ionen ( $\text{OH}^-$ ) gebildet oder verbraucht werden. Dabei wandern die Oxonium-Ionen zur negativ geladenen Kathode, die Hydroxid-Ionen zur positiven Anode. Die Ionenbeweglichkeit von  $\text{H}_3\text{O}^+$  und  $\text{OH}^-$



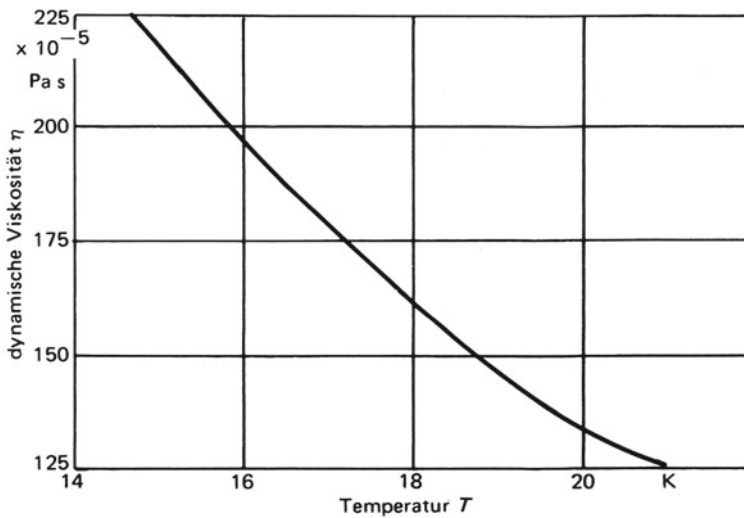
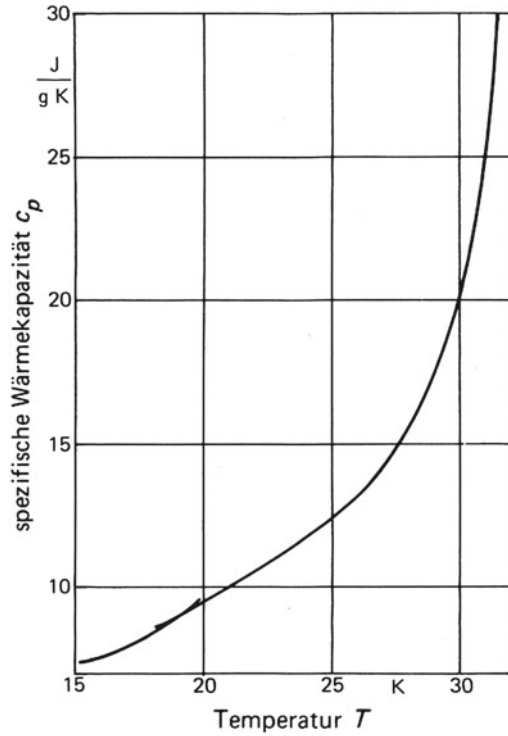
**Abb. 1.7** Spezifische Wärmekapazität von Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur

sind vergleichsweise hoch, da die Ionen nicht als Ganzes wandern, sondern nur Protonen ( $H^+$ ) verschoben werden, entsprechend dem Grotthuß-Mechanismus<sup>3</sup>. Dieser hat zur Folge, dass Protonen und Hydroxid-Ionen in wässriger Lösung im elektrischen Feld beweglicher sind, d. h. sie wandern vermeintlich schneller als andere Ionen. Somit besitzen sie eine größere Leitfähigkeit als andere Ionen, Abb. 1.12 a, b.

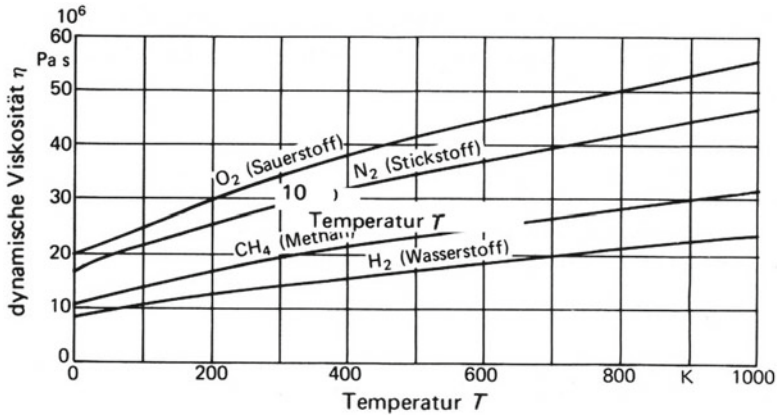
Im Idealfall ist die minimale Energie, die bei adiabatischer und isobarer Prozessführung zur Spaltung der Wassermoleküle aufgebracht werden muss, gleich der Reaktionsenthalpie  $\Delta H$ ; dieser Energiebetrag ist dem Elektrolysesystem in rein elektrischer Energie zuzuführen. Läuft der Elektrolyseprozess dagegen isotherm und isobar ab, kann aufgrund der thermodynamischen Beziehung  $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$  Energie von außen zugeführt werden. Der minimale, rein elektrische Energieaufwand entspricht dann der freien Reaktionsenthalpie  $\Delta G$ . Bei kleineren Energien als  $\Delta G$  ist die elektrolytische Wasserzersetzung nicht möglich. Wird nur  $\Delta G$  in elektrischer Form aufgebracht, verläuft die Reaktion endotherm, da noch die dem Term  $T\Delta S$  entsprechende Wärmemenge benötigt wird. Oberhalb der thermoneutralen Energie verläuft die Reaktion exotherm, die überschüssige Energie wird als Verlustwärme abgegeben.

<sup>3</sup> Peter W. Atkins: *Kurzlehrbuch Physikalische Chemie*. Wiley-VCH, Weinheim 2001, ISBN 3-527-30.433-9.

**Abb. 1.8** Spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur

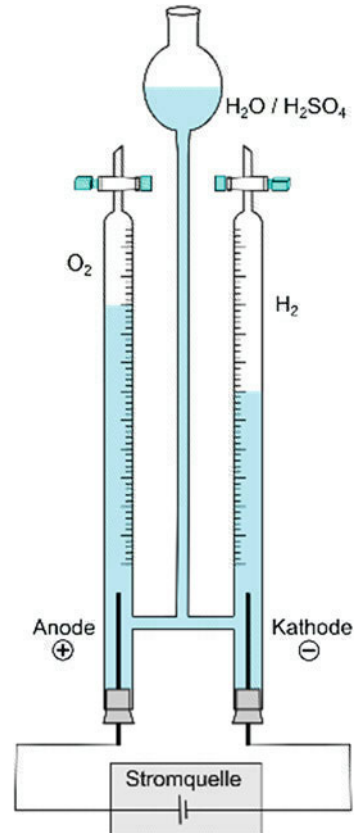


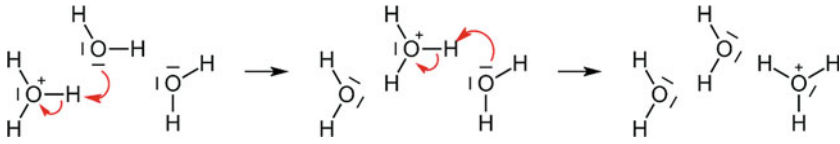
**Abb. 1.9** Dynamische Viskosität von flüssigem Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur



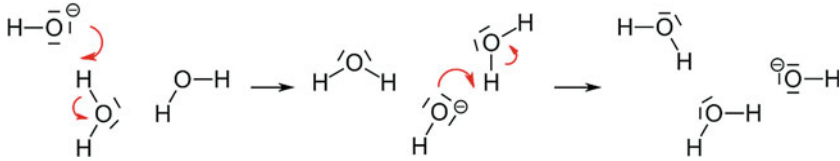
**Abb. 1.10** Dynamische Viskosität von Sauerstoff, Methan und Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur

**Abb. 1.11** Hofmannscher Zersetzungsapparat:  $\text{H}_2$  und  $\text{O}_2$  verhalten sich weitgehend wie ideale Gase. Damit haben die gemessenen Gasvolumina  $\text{H}_2$  zu  $\text{O}_2$  das Verhältnis 2:1 und folgen der Stöchiometrie der Elektrolyse. Die Gasvolumina sind proportional zum elektrischen Strom, der über die Zeit des Messung geflossen ist. Die Volumina sind also proportional zur elektrischen Ladung

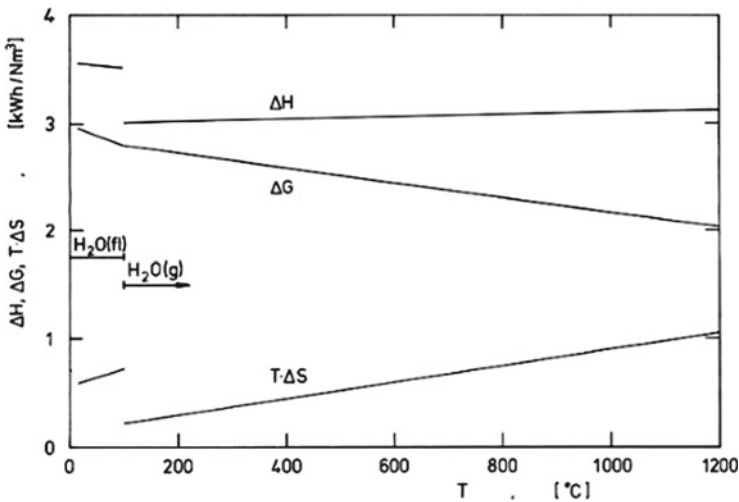




**Abb. 1.12 a** Scheinbare Diffusion eines Oxonium-Ions durch Verschiebung von Protonen, **b** Scheinbare Diffusion eines Hydroxid-Ion durch Verschiebung von Protonen



**Abb. 1.12** (Fortsetzung)



**Abb. 1.13** Temperaturabhängigkeit von  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  und  $T\Delta S$  bei der elektrolytischen Wasserzersetzungsreaktion ( $1 \text{ Nm}^3 = 1 \text{ m}^3$  bei  $T = 0^\circ \text{C}$  und  $p = 1 \text{ bar}$ )

Um einen Überblick über die Größe der aufzuwendenden Energiebeträge zu erhalten, sind in Abb. 1.13 diese mittels thermodynamischer Daten berechneten Temperaturabhängigkeiten für den Bereich zwischen  $25^\circ \text{C}$  und  $1200^\circ \text{C}$  aufgetragen<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>I. Barin, O. Knacke; Thermochemical Properties of Inorganic Substances, S. 316, 322, 323, 564, Düsseldorf 1973.