

F 03 B 916
UB/TIB Hannover



Innovationsforum

Wasserstofftechnologien in Mecklenburg-Vorpommern insbesondere im Hinblick auf die Nutzung regenerativer Energien

Tagung, 13. November 2001

zu: 01 H1 0109

Dokumentation

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
HANNOVER
TECHNISCHE
INFORMATIONSBIBLIOTHEK

ATI Küste GmbH
Joachim-Jungius-Straße 9 18059 Rostock
Tel. 0381/4 05 93 11 Fax 0381/4 05 93 10
E-Mail: ati-kueste-hro@t-online.de
www.ati-kueste.de

in Kooperation mit TBI
Technologie-Beratungs-Institut GmbH
Hagenower Straße 73 19061 Schwerin
Tel. 0385/3 99 31 65 Fax 0385/3 99 31 64
E-Mail: info@tbi-mv.de Internet www.tbi-mv.de

Gefördert vom
 **bmb+f**
Bundesministerium für Bildung und Forschung
mit Unterstützung
des Landes
Mecklenburg-

UB/TIB Hannover

89

122 988 280



Uca. 2305 Bl.

Teil II

Tagung

Wasserstofftechnologien in Mecklenburg-Vorpommern

13. November 2001
Stadthalle Rostock

Eröffnung/Begrüßung

Dr. Uwe Wurdel

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich begrüße Sie recht herzlich zum Innovationsforum Wasserstofftechnologien in Mecklenburg-Vorpommern in der Stadthalle Rostock. Dieses Forum wurde von der TBI GmbH Schwerin und der ATI Küste GmbH im Auftrage und mit finanzieller Unterstützung des Bundesministerium für Bildung und Forschung vorbereitet.

Als Beauftragten des BMBF darf ich Herrn Dr. Ernst vom Projektträger DLR willkommen heißen.

Das Wirtschaftsministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern hat wesentlich zur Durchführung dieses Forums beigetragen und die Organisatoren in vielfältiger Weise unterstützt. Deshalb freue ich mich Herrn Ministerialdirigenten Reichel, Leiter der Abt 2 Wirtschafts- und Strukturpolitik, Technologie und Energie auf unserer Veranstaltung begrüßen zu können.

Wir freuen uns, dass die Vertreter der wissenschaftlichen Einrichtungen aus den Hochschulen des Landes, so z.B. der FH Stralsund, FH Wismar, der Universitäten Greifswald und Rostock so zahlreich anwesend sind.

Stellvertretend für alle wissenschaftlichen Einrichtungen außerhalb unseres Bundeslandes möchte ich die Vertreter der TU Hamburg-Harburg, des ZSW Ulm und der LBSt Ottobrunn bei München sehr herzlich begrüßen.

Ein besonderes Anliegen ist es mir die Unternehmen aus unserer Region, aber auch über die Grenzen des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern hinaus zur heutigen Veranstaltung willkommen zu heißen. Sie stellen mit ihren Produkten und Dienstleistungen die Basis für die Entwicklung in dem heute zu diskutierenden Technologiebereich dar.

Wir haben in den vergangenen Wochen und Monaten eine intensive Diskussion zur Wasserstofftechnologie in Mecklenburg-Vorpommern geführt. Die Ergebnisse dieser Diskussion werden sich heute in den Beiträgen widerspiegeln.
U.a. haben wir Workshops zu den Technologiefeldern

H₂ - Erzeugung
H₂ - Speicherung
H₂ - Energiewandlung mittels Verbrennungskraftmaschinen
H₂ - Energiewandlung mittels Verbrennungskraftmaschinen
sowie Querschnittsfragen

mit Teilnehmern aus vielen namhaften Einrichtungen Deutschlands durchgeführt.

Mit dem heutigen Innovationsforum werden wir eine Zwischenbilanz über den erreichten Entwicklungsstand in diesen Technologiefeldern ziehen und gleichzeitig die sich ergebenden Potenziale für Mecklenburg-Vorpommern diskutieren.

Dabei möchte ich Sie auch auf die Ausstellung Wasserstofftechnologien in M-V aufmerksam machen. Ich wünsche uns in diesem Sinne interessante Vorträge und eine spannende Diskussion.

Vortrag des Abteilungsleiters für Wirtschafts- und
Strukturpolitik, Technologie, Energie im
Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern,
Gerd-Rüdiger Reichel,

Zukunftstechnologien in Mecklenburg-Vorpommern

anlässlich des

**Innovationsforum „Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien in
Mecklenburg-Vorpommern“**

am 13. November 2001, 11.55 Uhr

in der Stadthalle Rostock

Es gilt das gesprochene Wort

Anrede:

Begrüßung

Ich freue mich, bei Ihnen sein zu können und wünsche Ihnen ein erfolgreiches Gelingen des Innovationsforums „Wasserstoff- und Brennstoffzellen – Technologien in Mecklenburg-Vorpommern“ und ich darf dieses auch im Namen von Herrn Minister Dr. Ebnet tun.

Anrede

traditionelle Industrie

Das Thema „Technik und Technologie“ oder sogar **Hochtechnologien** in einem Atemzug mit „Mecklenburg-Vorpommern“ zu nennen, ruft bei vielen Mitmenschen immer noch ungläubiges Staunen oder Skepsis hervor. Das Image unseres Landes ist im In- und Ausland oft verbunden mit schöner Landschaft, mit weißem Ostseestrand, vielen Seen, Wäldern und gelben Rapsfeldern. Dabei können wir auf eine eigene wissenschaftlich-technische Tradition zurückgreifen. Was vielen nicht bewusst ist, auch unsere Region hat große Persönlichkeiten mit hervorragenden Leistungen und Erfindergeist hervorgebracht. Ich denke dabei an:

Ernst Alban - Konstrukteur von mannigfaltigen Maschinen, Schiffen und Dampfmaschinen oder an

Johann Heinrich Albrecht Tischbein - er entwickelte und baute 1851 das erste eiserne, seegängige, schraubengetriebene Dampfschiff Deutschlands,

an **Alexander Behm** - Erfinder des Echolots und nicht zuletzt an **Gustav und Otto Lilienthal** - die Flugpioniere aus Anklam, deren Forschung und persönlicher Einsatz das Flugwesen entscheidend voranbrachte.

Auch solche bekannte Unternehmen wie Arado, Dornier, Fokker und Heinkel prägten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit dem Flugzeugbau die Region.

Heute gibt es in unserem Land wiederum **kluge Köpfe** in Wissenschaft und Wirtschaft, die auf Technologiefeldern tätig sind, die es in Mecklenburg und Vorpommern vor zehn Jahren noch nicht gab. Auch Mecklenburg-Vorpommern setzt auf Zukunftstechnologien und wird Schritt für Schritt zu einem Technologiestandort mit Firmen, deren Produkte und Dienstleistungen internationale Beachtung finden.

Die explosionsartige Entwicklung neuer Produkte und Methoden in der Biotechnologie und Biomedizin, aber auch in der IuK- Branche öffnen Wege in Zukunftsbereiche, deren Ausmaß gegenwärtig nur erahnt werden kann.

Landwirtschaft, maritime Industrie und Tourismus sind zwar unzweifelhaft die **drei traditionellen Säulen**

Mecklenburg-Vorpommerns und werden auch in Zukunft bedeutend für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes sein, sie reichen jedoch nicht aus. Die größten Zuwächse werden Unternehmen erzielen, die im Bereich der Zukunftstechnologien Spitzenprodukte und – dienstleistungen anbieten.

Anrede

Entwicklungsbeispiele

Wir können erste **Erfolge** in Mecklenburg-Vorpommern verzeichnen. Entwicklungen „*made in M-V*“ aus der Biomedizin und Medizintechnik - also Bereiche der sogenannten roten Biotechnologie - haben z.B. in der Fachwelt Aufmerksamkeit erregt. Stellvertretend für viele hervorragende Leistungen sind die zwei Weltneuheiten auf dem Gebiet der Medizintechnik:

- das Hydrojet-Skalpell der Firma Andreas Pein Medizintechnik GmbH Schwerin und
- die s.g. künstliche Leber, ein Leberdialyseverfahren, der TERAKLIN AG Rostock

zu nennen.

In M-V entstand z.B. auch ein hochleistungsfähiges **Telefon- und Datennetz** und die modernste Datenautobahn Europas. Diese flächendeckende digitale Vernetzung stellt für das Land Mecklenburg-Vorpommern eine großartige Chance dar und bietet Raum für neue intelligente Dienstleistungen und Systemlösungen. Neben den 38 Call-Centern haben sich hier auch Softwareentwickler und andere Dienstleister angesiedelt. In der IuK-Branche sind gegenwärtig schon 600 vorwiegend kleine und mittlere Unternehmen mit ca. 5.000 Beschäftigten tätig. Rechnet man Call-Center, kleine und mittlere Unternehmen und die großen der Branche, wie z.B. Telekom zusammen, dann sind es ca. 17.000.

Anrede

Technologiepolitik

Die Schaffung und der Ausbau von Kompetenzen auf verschiedenen Gebieten ist und bleibt ein entscheidender Wirtschaftsfaktor.

Unsere spezialisierten Technologiezentren, wie das Biotechnikum Greifswald, das Biomedizintechnikum Teterow, das Forschungszentrum für Biosystemtechnik und Biomaterialien Rostock, das Zentrum für Lebensmitteltechnologie Neubrandenburg und das im Bau befindliche Kunststoffkompetenzzentrum im Technologiepark in Wismar, stellen dabei Kerne mit überregionaler Ausstrahlung dar.

Der Technologietransfer „über Köpfe“, d.h. die enge projektbezogene Zusammenarbeit von Wissenschaftlern und Unternehmern bei der Entwicklung neuer Produkte und der Einführung neuer technologischer Lösungen, ist für die Wettbewerbsfähigkeit der Firmen besonders wichtig.

Kooperationen zwischen wissenschaftlicher Forschung und unternehmerischer Tätigkeit sind bei diesem ständigen Wettlauf mit der Zeit - nach meiner Meinung - die beste Erfolgsgarantie.

Dieses ist unser Leitbild für die Technologie- und Innovationspolitik in Mecklenburg-Vorpommern.

Das Land setzt auf eine verstärkte Technologie- und Innovationsförderung. **So** steht im Technologie- und Innovationsförderprogramm - kurz TIF genannt - für das Jahr 2001 ein Fördervolumen von 29,8 Mio. DM zur Verfügung.

Besonders unterstützt werden als Schwerpunkte der Technologiepolitik:

- der Aufbau einer bedarfsgerechten Forschungs- und Technologieinfrastruktur;
- die Schaffung effizienter Formen des Technologietransfers;
- die Förderung der wirtschaftsnahen Forschung an den Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen;
- die Förderung von technologieorientierten Unternehmensgründungen und Ansiedlungen; sowie
- die Förderung der Entwicklung neuer Produkte, Verfahren, Dienstleistungen und Materialien mit hoher Qualität.

Für den Aufbau der 10 Technologiezentren wurden bisher insgesamt 250 Mio. DM bereitgestellt. **Weitere** Zentren wie z.B. das Multimediazentrum oder das Biomedizinische Forschungszentrum in Rostock werden folgen.

Im Rahmen der Technologie- und Innovationsförderung wurden bis heute über 1.700 Projekte der Produktentwicklung, des Personaltransfers und der Sicherung von Patenten mit rund 177 Mio. DM gefördert.

Anrede

Wachstumspole

Die Wirtschaftspolitik des Landes zielt auf die Sicherung und Weiterentwicklung der vorhandenen Unternehmen sowie auf die Ansiedlung neuer innovativer Unternehmen im Land.

Das Land baut seine Stärken durch die Entwicklung zukunftssträchtiger Wachstumspole aus.

Aufbauend auf solchen Wachstumspolen sollen die Akteure der Wirtschaftsförderung die Ansprache von Unternehmen so organisieren, dass die Vorteile des Standortes Mecklenburg-Vorpommern an die potenziellen Investoren herangetragen und Interessenten zielgerichtet begleitet werden.

Die Herausbildung und Entwicklung solcher Wachstumspole (auch „Cluster“ genannt) wird mit den Instrumenten der Wirtschaftspolitik unterstützt.

Cluster sind für mich Netzwerke von Unternehmen wissenserzeugenden Akteuren (Hochschulen, Forschungsinstitute) und Nachfragern, die in einer Wertschöpfungskette verbunden sind.

Es sind räumliche oder branchenbezogene Netzwerke von Unternehmen und Institutionen, die durch Zusammenarbeit nach innen und außen Wachstumsprozesse fördern.

Durch die Etablierung von Wissenschaftskompetenz und durch den Aufbau regionaler Unternehmensnetzwerke werden diese Wachstumspole dazu beitragen, vorhandene Unternehmen wettbewerbsfähiger und stärker zu machen sowie neue branchenbezogene Ansiedlungsanreize zu schaffen.

Solche Strukturen, Unternehmens- und Forschungsgeflechte und Zulieferbeziehungen sind für die Standortentscheidungen von Unternehmen von großer Bedeutung.

Wettbewerbe

Auf die Wettbewerbe, die durch das Bundesforschungsministerium in dieser Hinsicht ausgeschrieben wurden, also BioRegio, InnoRegio und Wachstumskerne, will ich an dieser Stelle nur kurz eingehen.

Wir haben für die wissenschaftliche Kompetenz in Mecklenburg-Vorpommern im Bereich der Biotechnologie das Markenzeichen „BioCon-Valley“ erfunden.

Aus „BioRegio“ ist in Mecklenburg-Vorpommern inzwischen der BioConValley-Verbund geworden. **Die** BioCon-Valley GmbH befindet sich in der Gründung.

BioCon-Valley soll alle Aktivitäten der Biotechnologie, Biomedizin und Medizintechnik bündeln.

BioCon-Valley gibt jetzt schon Impulse für die Grundlagenforschung.

BioCon-Valley unterstützt Firmenansiedlungen und die Bildung von Kompetenzclustern.

Wir versprechen uns davon ein positives Image und Werbung für den Biotechnologiestandort Mecklenburg-Vorpommern. **Die** jetzt schon Tätigen sollen besser zusammenarbeiten.

Biotechnologien sind ein Markt mit Zukunft.

Wir wollen vorne mit dabei sein, am besten ganz vorne.

Ich glaube, wir sind auf gutem Wege.

In der vergangenen Woche fand in Teschow das **1. internationale Baltic Biotech Forum** statt. 150 Teilnehmer aus 13 Ländern, insbesondere dem Ostseeraum nahmen daran teil. Wir wollen gemeinsam mit dem dänisch –schwedischen Medicon Valley ein Ostsee – Netzwerk schmieden.

Auch die 1999 speziell für die neuen Bundesländer gestartete Förderinitiative InnoRegio war für Mecklenburg-Vorpommern ein Erfolg.

Es ist gelungen, Prozesse der Selbstorganisation in der jeweiligen Region in Gang zu setzen.

Entstanden sind Partnerschaften und Kooperationen zwischen Wirtschaftsunternehmen, Bildungs- und Forschungseinrichtungen sowie der Verwaltung.

Vier Sieger bei diesem Wettbewerbe sind aus Mecklenburg-Vorpommern:

- die Maritime strategischen Allianz in der Region „Küste“;
- das Diabetes Informations- und Service-Center Ostvorpommern;
- das Kunststoffzentrum Westmecklenburg;
- das Nukleus-Netzwerk Präzisionsmaschinenbau Parchim-Wismar-Rostock.

InnoRegios“ sind ein breit angelegtes Instrumentarium für ein enges Miteinander von Wirtschaft und Wissenschaft.

Jetzt beginnt die Umsetzung der Ideen in die Praxis – **wir** spüren, dass sich etwas bewegt.

Die 4 Projekte des Landes erhalten bis 2005 insgesamt 95 Mio. DM vom Bund für die Realisierung der Projekte – **das** ist eine ganze Menge Geld und das wird uns helfen.

Außerdem hat das Bundesforschungsministerium die Fördermaßnahme „Innovative regionale Wachstumskerne“ aufgelegt. **Ziel** ist die Unterstützung regionaler Initiativen, damit die hohen wissenschaftlich-technologischen Potenziale der neuen Länder in erfolgreiche Innovationen auf Märkten umgesetzt werden.

Ein Projekt auf dem Gebiet der Schiffssicherheit war schon erfolgreich. **Neue** „Wachstumskerne“ befinden sich in Vorbereitung. Einer dieser neuen Wachstumskerne ist das Thema des heutigen Innovationsforums „Wasserstoff- und Brennstoffzellen – Technologien in Mecklenburg-Vorpommern“, das vom BMBF gefördert wird.

Anrede

Wasserstofftechnologien

Der Energiemarkt befindet sich im Wandel.

Energiewirtschaftliche Strukturen werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten großen Änderungen unterworfen sein. Die Gründe dafür sind vielfältig und

reichen von der Notwendigkeit des Klimaschutzes, d.h. die Reduzierung der Emission von Treibhausgasen, bis hin zur spürbar werdenden Verknappung fossiler Brennstoffe, insbesondere von Erdöl und Erdgas. Ein weiterer Grund ist sicherlich auch, dass die Atomenergie zunehmend ein hohes Gefahrenpotenzial darstellt und immer weniger Akzeptanz hat. Wasserstoff zählt unbestritten zu den Energieträgern der Zukunft und wird vor allem in den Bereichen der Energiewirtschaft und des Verkehrs zu neuen ökologischen und ökonomischen Versorgungs- und Antriebslösungen führen. Der z.B. aus regenerativer Energie (Wind-, Solar- und BioEnergie) erzeugte Wasserstoff bildet zusammen mit dem hohen Wirkungsgrad der Energieumwandlung in der Brennstoffzelle die Basis für die Senkung der CO₂-Emissionen. Dem Wasserstoff kommt in einem regenerativen Energie-Szenario im wesentlichen die Rolle als Energiespeicher, als Energieträger für Verbrennungsprozesse und als Energieträger zur Erzeugung elektrischer Energie mittels Brennstoffzellen zu.

Für unser Land ist die **Anwendung der Brennstoffzellentechnik** insbesondere in Nischenbereichen, z.B. Antriebe für Bootsmotoren, Kleinbahnen, Bussen, d.h. im touristischen Bereich, sinnvoll. Die Entwicklungen stehen jedoch noch am Anfang und haben den Charakter von Modell- und Pilotprojekten. Typische Zielmärkte in M-V sind

Über- und Unterwasserfahrzeuge oder der Camping- und Freizeitbereich. Aber es gibt auch Unternehmen, die sich mit der Brennstoffzellenentwicklung mit hohem Wirkungsgrad und Brennstoffzelle für mobile Heizungen beschäftigen.

Die Einführung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie ist nicht nur für die Entwicklung neuer industrieller Wachstumskerne von Bedeutung, sondern auch für die Umwelt und die Schonung der Energieressourcen. Damit wird sie zu einer wichtigen volkswirtschaftlichen Größe. Gerade da sich die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie noch nicht auf dem Markt etabliert hat und sich noch in der Entwicklungsphase befindet, bestehen große Chancen für junge innovative Unternehmen auf diesem Gebiet erfolgreich zu werden. Dabei ist die unzureichende **Vernetzung des regionalen Innovationspotentials** in sich sowie mit überregionalen Akteuren ein Defizit, das beseitigt werden muss.

Anrede

In Mecklenburg-Vorpommern gibt es einige Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die sich mit Technologien

zur Gewinnung und Verwendung von Wasserstoff beschäftigen.

Die ersten industriellen Entwicklungsaktivitäten auf den Gebieten der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in M-V werden im Rahmen des **Verbundprojektes DeepC** (aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen durch die Firmen AIR Fertigung-Technologie GmbH Hohen Luckow, Enitech GmbH Bentwisch und ATI Küste GmbH Rostock erbracht, um nur ein Beispiel zu nennen. Die Fachhochschule Stralsund ist im Lehrbereich auf dem Gebiet Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie tätig und verfügt über Demonstrationsanlagen.

Das Institut für organische Katalyseforschung an der Universität Rostock ist auf dem Gebiet der Wasserstoffanwendung im chemischen Bereich tätig.

Diese industriellen Entwicklungsaktivitäten waren für die ATI Küste GmbH **Anlass**, eine **Wasserstofftechnologie-Initiative** von Unternehmen und Institutionen aus Mecklenburg-Vorpommern ins Leben zu rufen. Durch Kooperationen mit der Fachhochschule Stralsund und der Universität Rostock sowie weiteren Partnern soll ein **regionales Cluster** der Brennstoffzellentechnologie gebildet werden, mit dessen Hilfe neue Anwendungsfelder

und die Entwicklung und Vermarktung neuer Produkte gefördert werden sollen.

Durch die Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die den gemeinsamen Antrag im Rahmen der BMBF-Initiative „Innovative regionale Wachstumskerne“ getragen haben, ist die Gründung eines Kompetenzzentrums Wasserstoffenergie-technik vorgesehen, das in enger Kooperation mit dem Komplexlabor „Regenerative Energien“ an der Fachhochschule Stralsund arbeiten soll. Es soll eine verstärkte **Kooperation und Bündelung** der Akteure erreicht, Verbundprojekte initiiert und gemanagt, Existenzgründungen unterstützt und neue Finanzierungsquellen erschlossen werden.

Die Landesregierung unterstützt die Konzeption zum **Netzwerk** „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Mecklenburg-Vorpommern“ mit Nachdruck.

Schluss

Anrede:

Die Landesregierung räumt der Förderung von Zukunftstechnologien einen breiten Raum ein.

Wir haben schon viel geschafft in Mecklenburg-Vorpommern. Alle diese Beispiele zeigen, welche Dynamik die Technologieentwicklung in Mecklenburg-Vorpommern genommen hat.

Ziel der Technologiepolitik ist es, für die Lösung ökonomischer, ökologischer und sozialer Fragen des Landes ein technik- und wissenschaftsfreundliches, innovatives Klima zu schaffen.

Die Nutzung der wichtigsten Ressourcen, der Intelligenz und Kreativität der Menschen des Landes, ist Grundlage für die Gründung und Ansiedlung innovativer und zu Innovationen fähiger Unternehmen.

Nur so wird es möglich sein, ein qualifiziertes und zukunftssicheres Arbeitsplatzangebot in größerem Umfang zu erreichen und damit der Abwanderung von Fachkräften aus Mecklenburg-Vorpommern entgegenzuwirken.

Allen Teilnehmern des Forums wünsche ich interessante Vorträge mit anregenden Fachdiskussionen und wissenschaftlichen Streitgesprächen.

Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit.



Wasserstofftechnologien in Mecklenburg-Vorpommern

Dr. Ulrich Bünger, Jörg Schindler, Lutz Reichelt



L-B- Systemtechnik GmbH
Ottobrunn / Dresden



Schaffung nachhaltiger Energiestrukturen

Es ist ein grundlegender Umbau unserer energiewirtschaftlichen Strukturen erforderlich. Gründe dafür sind:

- **Die Notwendigkeit des Klimaschutzes, das heißt die Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen**
- **Die sich abzeichnende spürbar werdende Verknappung fossiler Brennstoffe, insbesondere von Erdöl und Erdgas**



- Liberalisierung der Märkte für Strom und Gas
- Kyoto-Protokoll
- Grünbuch der EU zur Versorgungssicherheit
- Deutschlands Ausstieg aus der Kernenergie
- Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)
- Ökosteuer



Technologische Trends

- Fortschritte bei der Nutzung erneuerbarer Energien
 - Windkraft
 - Photovoltaik
- Die Brennstoffzelle
 - als Antrieb für das Auto von Morgen
 - in dezentralen Blockheizkraftwerken
- Wasserstoff als Sekundärenergieträger
 - in stationären Anwendungen
 - als Kraftstoff für den bodengebundenen Verkehr
- Elektrolyseure



- **Automobilindustrie**
 - Reduktion der CO₂-Emissionen
 - Öffnung des Verkehrssektors für erneuerbare Energien
- **Hausenergieversorgung auf Basis von Brennstoffzellen und Erdgas führt zu neuen Strukturen**
- **Große Mineralölkonzerne befassen sich zunehmend mit erneuerbaren Energien**
- **Liberalisierung der Stromwirtschaft führt zu dezentralen Erzeugungsstrukturen**



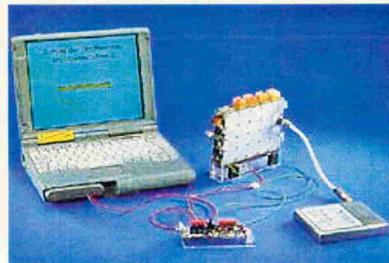
Anwendungen von Brennstoffzellen



Mobil



Brennstoffzelle



Tragbar



Stationär





Wasserstoff — Symbol für eine nachhaltige Energiewirtschaft

- Zunehmende Nutzung von Solarenergie erforderlich
- Wasserstoff als universeller Sekundärenergieträger in einer nachhaltigen Energiewirtschaft
 - fossil und erneuerbar herstellbar
 - erleichtert gleitenden Übergang zu erneuerbaren Energien
- Wasserstoff vielfältig verwendbar
- Wasserstoff ist in der Verwendung effizient und sauber



Wasserstofftechnologien in Mecklenburg-Vorpommern

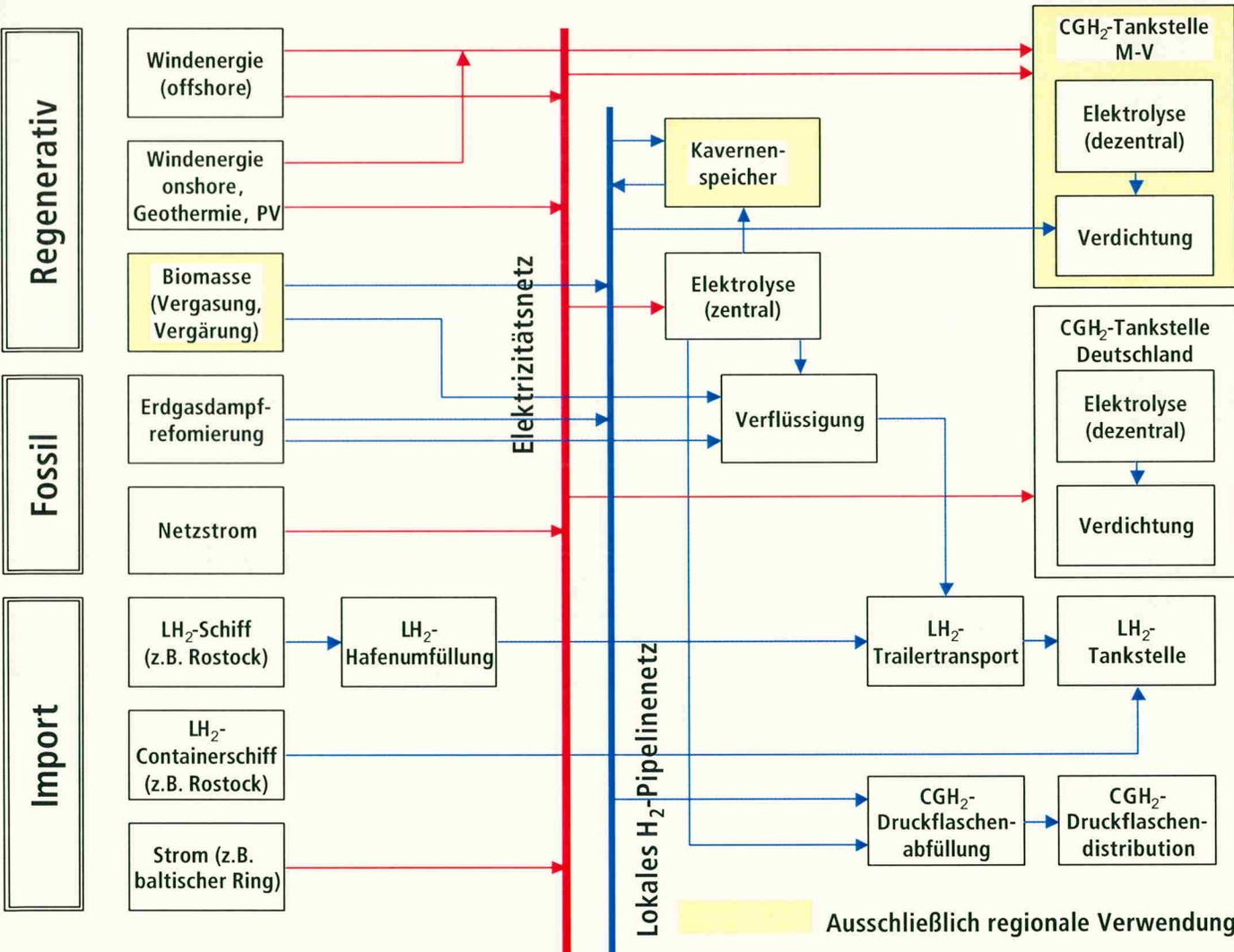
Mögliche Ansatzpunkte für viele Branchen

(Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Fischerei, Industrie, Verkehr und Tourismus):

- Erzeugung
 - Windenergie (binnenländisch und offshore)
 - Nutzung der großen Biomassepotenziale
 - Geothermie
- Verwendung
 - Transportmittel mit Brennstoffzellenantrieben für den Tourismus (Busse, Scooter, Ausflugsschiffe)
 - Stromerzeugungsaggregate (für Campingfahrzeuge, Privatschiffe)
- Infrastruktur
 - Wasserstoff in Druckbehältern für mobile und portable Brennstoffzellenanwendungen
 - Hafenumschläge von Flüssigwasserstoff-Containern
 - Kavaernenspeicher

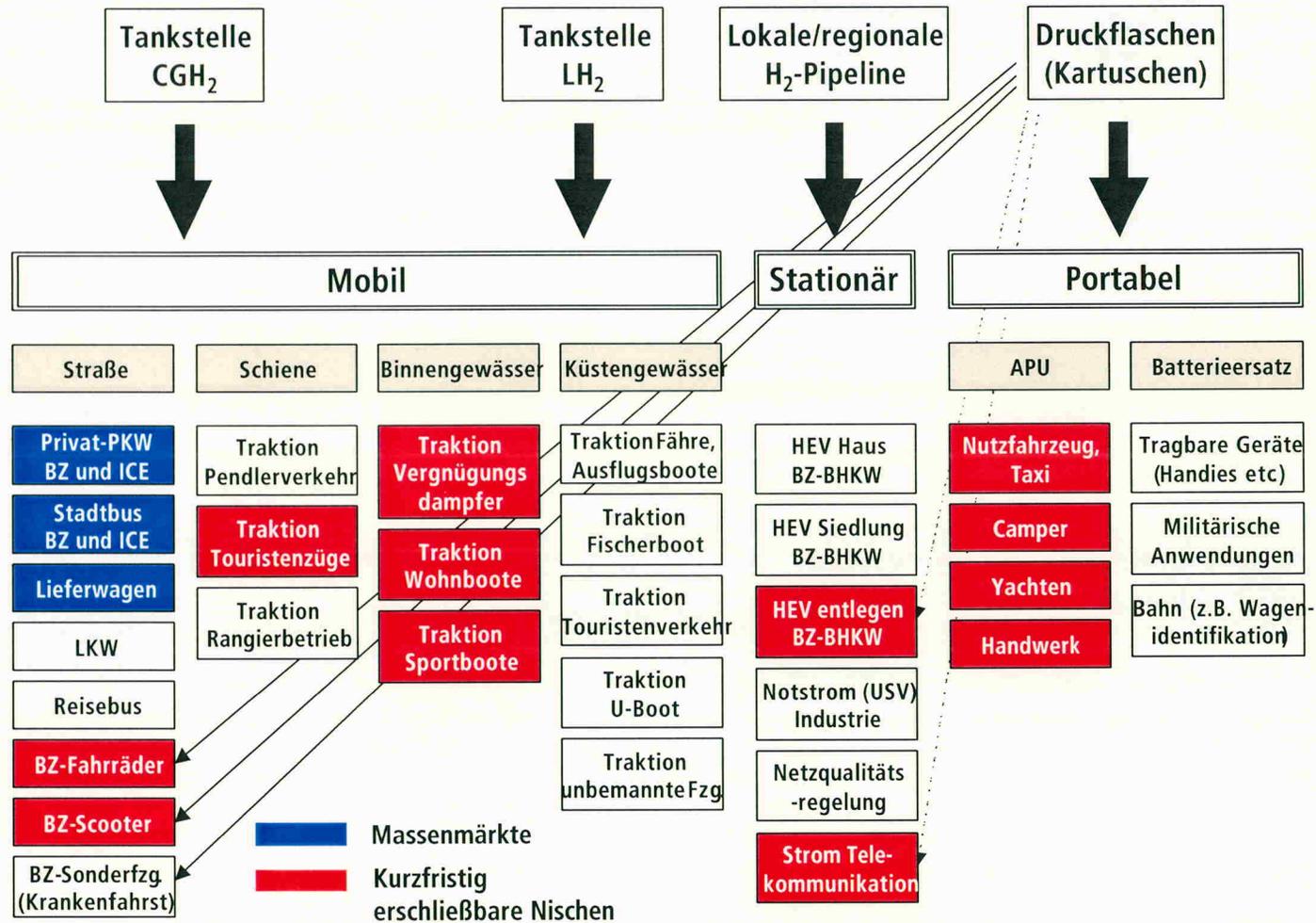


Mittelfristig relevante Wasserstoff-Energiepfade für Mecklenburg-Vorpommern



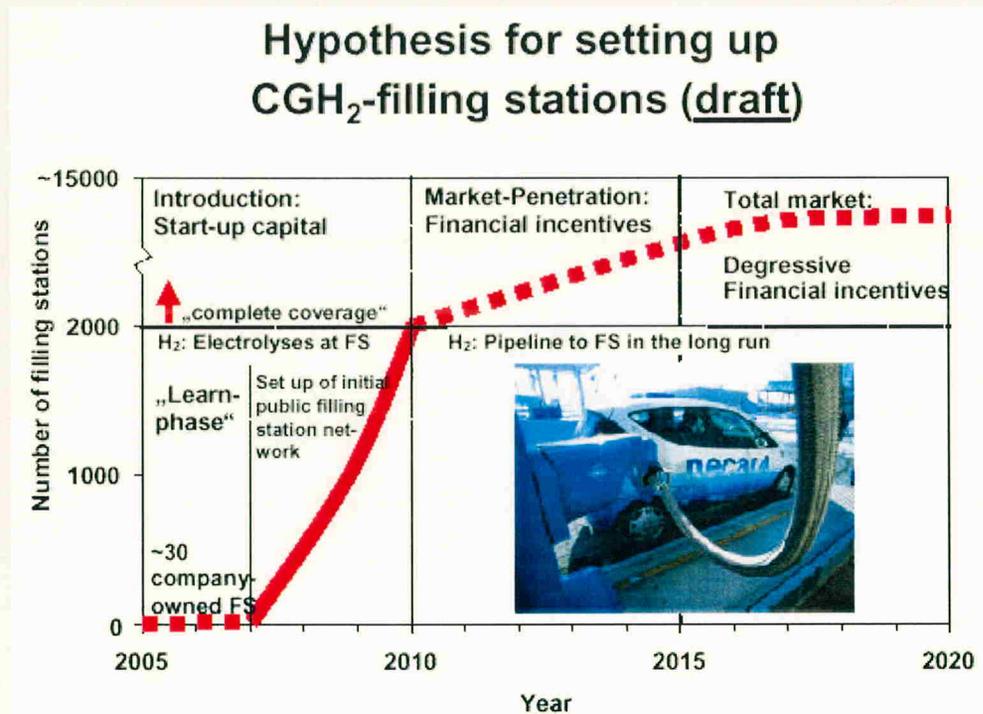


Mittelfristig relevante Wasserstoffmärkte in Mecklenburg-Vorpommern



Tankstellen - Aufbauszenarien

- Verkehrswirtschaftliche Energie Strategie – VES:

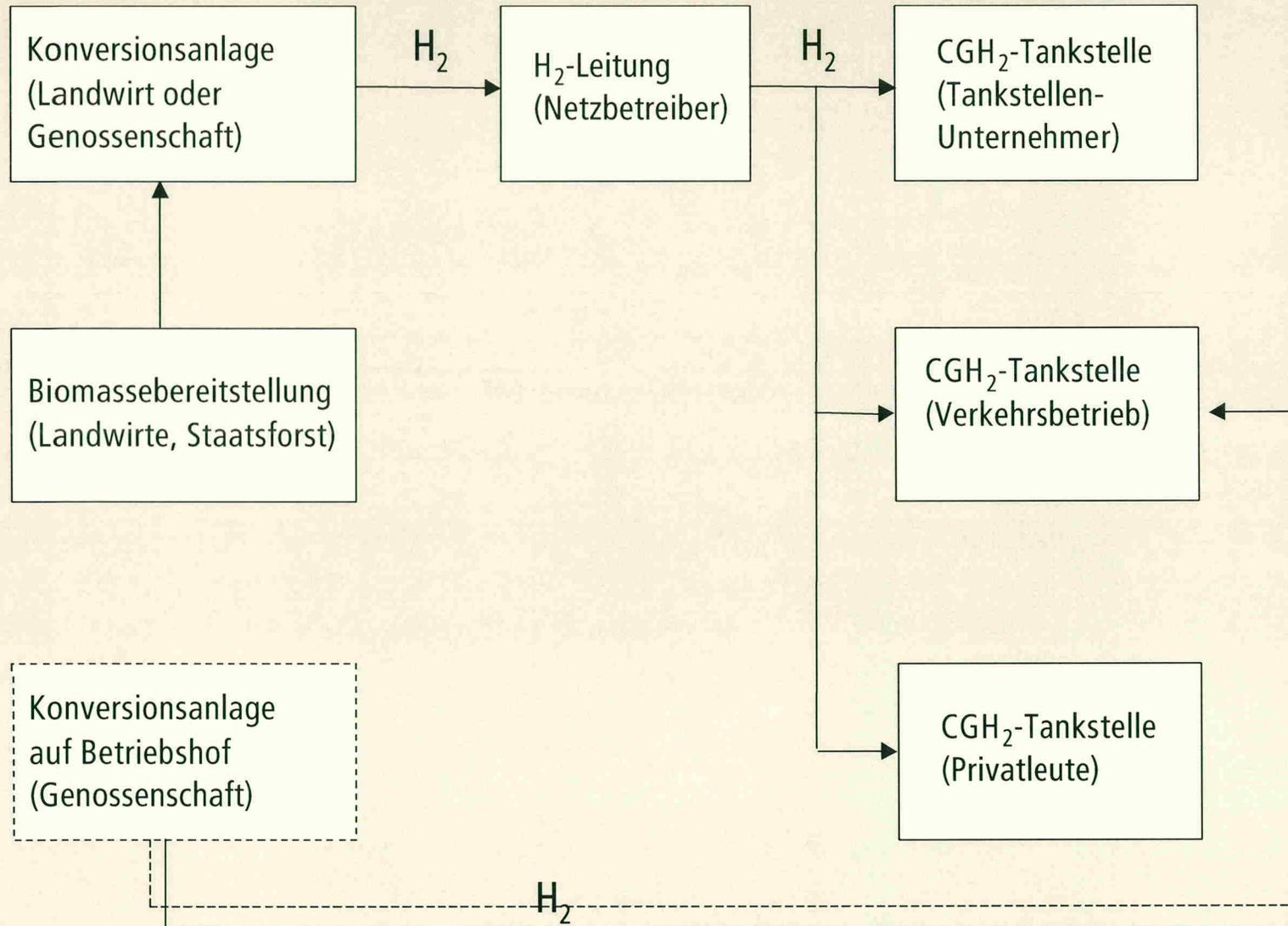


- 30 CGH₂Tankstellen in Deutschland bis 2007
- 2000 Tankstellen in Deutschland bzw. 15% bis 2010
- Weitere Markterschließung ab 2010





Druckwasserstoff aus Biomasse





Handlungsempfehlungen

- Strategieformulierung
- Bildung eines Netzwerkes „Wasserstofftechnologien“
- Vergabe von Studien zu wichtigen offenen Fragen
- Aufbau bzw. Stärkung der eigenen Industriekompetenz
- Aufbau bzw. Stärkung des Expertenwissens in Forschung, Entwicklung und Lehre
- Definition und Initiierung von Pilot- und Demonstrationsprojekten
- Öffentlichkeitsarbeit



Informationen zum Thema Energie:

Websites der L-B-Systemtechnik:

Informationen zum Thema Wasserstoff und Brennstoffzellen:

www.HyWeb.de

Informationen zum Thema fossile Energieträger:

www.Energiekrise.de

Informationen zur Brennstoffzelle:

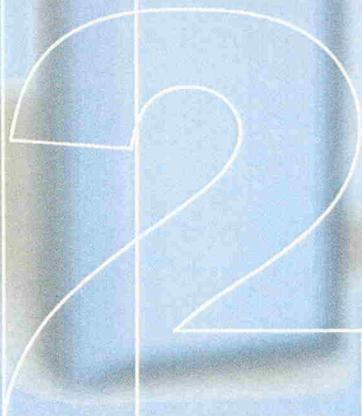
www.innovation-brennstoffzelle.de

Informationen zu Wasserstoff-Projekten:

www.h2guide.de

- **Wasserstoffwirtschaft – Vision oder Fiktion?**

Eberhard Behrend, DWV



Hintergrund

Unser auf fossile Energieträger gestütztes Energiesystem ist **nicht zukunftsfähig**. Die beiden wichtigsten Gründe:

Erschöpfung der Ressourcen

Bei Öl ist etwa ab 2010 mit Preissteigerungen zu rechnen, auch Erdgas und Kohle sind nicht ewig da

Klimaschutz

Die exzessive Freisetzung von CO₂ hat bereits zu irreversiblen Klimaveränderungen geführt, deren Auswirkungen wir erst noch spüren werden.



Was sollen wir statt dessen verwenden?

Jules Verne sah es voraus



"Was werden wir später einmal statt Kohle verbrennen?", fragte der Seemann.

"Wasser", antwortete Smith.

"Wasserstoff und Sauerstoff werden für sich oder zusammen zu einer unerschöpflichen Quelle von Wärme und Licht werden, von einer Intensität, die die Kohle überhaupt nicht haben könnte; das Wasser ist die Kohle der Zukunft."

"Die geheimnisvolle Insel", 1874

Dichtung und Wahrheit

„Experten sehen Probleme im Transport und in der Lagerung des **hochflüchtigen** und **explosiven** Wasserstoffs, der sich selbst aus Stahlbehältern auf die Dauer verflüchtigt.“
(*Kölnische Rundschau*, 11. Januar 2001)

„Ich denke immer an den **Zeppelin**, wenn ich an Wasserstoff denke.“
(VW-Vorstandsvorsitzender Ferdinand Piëch am 20. Februar 2001)

**In Teilen der Öffentlichkeit gilt
Wasserstoff als sehr gefährlich.**

Wie sehen die Tatsachen aus?



Eigenschaften von Wasserstoff

- Chemisches Element, Ordnungszahl 1
- erstes und häufigstes Element des Universums
- als Element erkannt 1769
- einfachstes Atom (1 Proton, 1 Elektron)
- in reiner Form molekular
- farb- und geruchloses Gas
- **brennbar**
- leichtester Stoff
- siedet unter Atmosphärendruck bei $20\text{ K} = -253\text{ °C}$
- häufiges Element, aber fast immer chemisch gebunden
- wichtiger Chemierohstoff
- physiologisch neutral

Wasserstoff ist **brennbar**

- Gemische mit Sauerstoff (Luft) können **explosiv** sein
- niedrige **Zündenergie**

Kleines Molekül

- geringe Viskosität, hohe **Leckrate**
- **diffundiert** schnell (auch nach unten!)
 - **versprödet** manche Werkstoffe

Speicherung

- **komprimiert**: steht unter Spannung
 - **verflüssigt**: tiefe Temperatur
-

Wasserstoff versprödet Werkstoffe...?

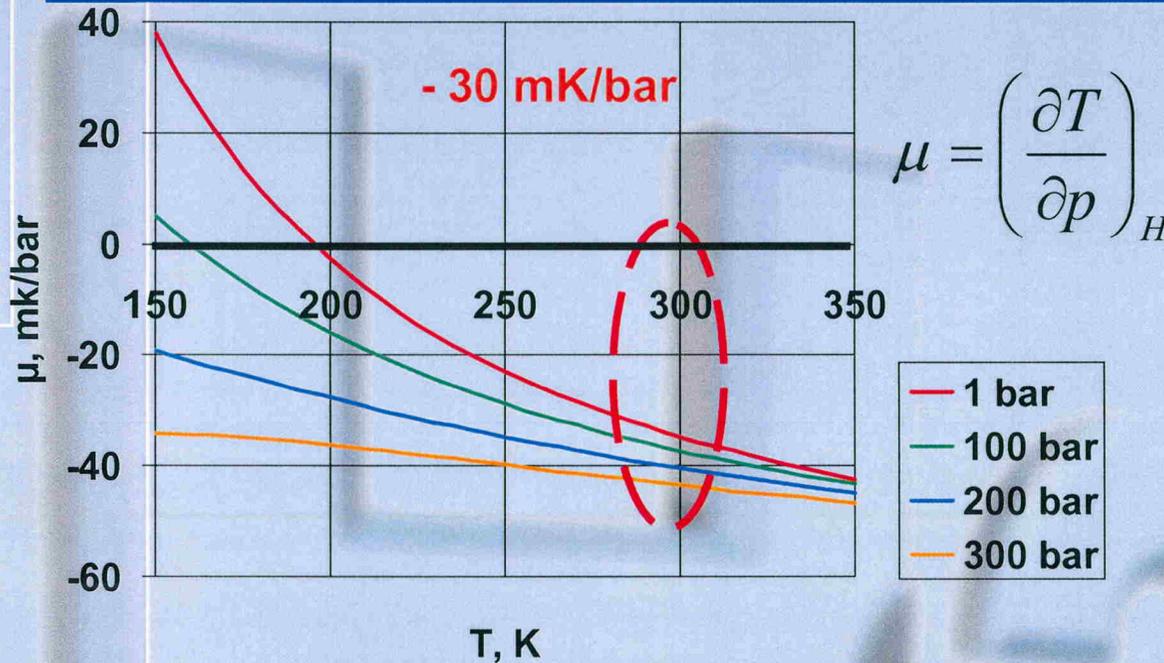
Kaltversprödung: durch Kontakt mit tiefkalten Gasen oder überhaupt durch Kälte. Reversibler Vorgang. Durch Wahl der Werkstoffe beherrschbar.



Wasserstoffversprödung: Wechselwirkung von atomarem (!) Wasserstoff mit Kristallgittern, führt zur beschleunigten Spannungsrisskorrosion. Anfällig sind kubisch-raumzentrierte Kristallgitter (ferritischer Stahl) bei ungeeigneten Bedingungen (hohe Spannungen im Material). Kubisch-flächenzentrierte Gitter (austenitischer Stahl, Al, Ni, Ms) sind nicht anfällig.



Negativer Joule-Thomson-Koeffizient ...?

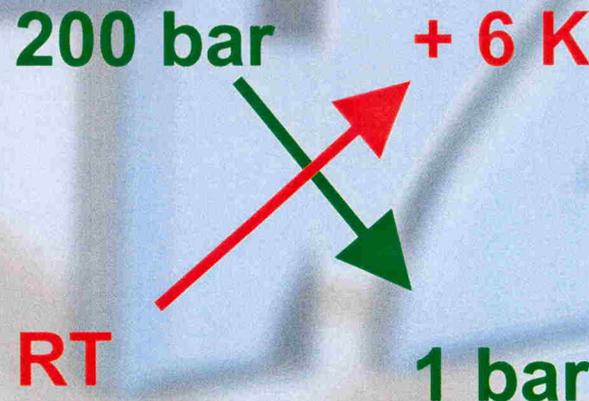


Bei isenthalper Entspannung (Joule-Thomson-Prozess) kühlt sich Wasserstoff bei Raumtemperatur nicht ab, wie viele andere Gase, sondern erwärmt sich.

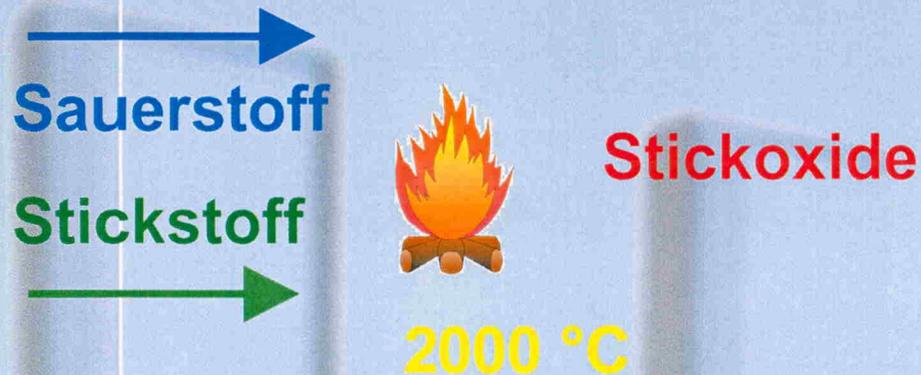
Ist das gefährlich?

Theoretische Erwärmung um 6 K

Keine Zündgefahr!



Verbrennen erzeugt Stickoxide...?



Bei Verbrennungen mit Luft reagieren der Sauerstoff und der Stickstoff der Luft miteinander.
Kein Wasserstoff-Problem

Bei Wasserstoff ist das Problem sogar kleiner:

Durch den weiten Reaktionsbereich von Wasserstoff/Luft-Mischungen lassen sich Betriebszustände mit so geringen Emissionen einstellen, wie sie bei Kohlenwasserstoffen nicht einmal theoretisch möglich wären.

„Aus unserem Motor geht die Luft manchmal sauberer hinaus als sie hereingekommen ist.“ (BMW-Entwickler)

Wasserstoff ist nicht...

- explosiv
- zerfallsfähig (Acetylen!)
- selbst entzündlich
- oxidierend (brandfördernd)
- giftig
- ätzend
- radioaktiv
- übel riechend
- ansteckend
- Wasser gefährdend
- Frucht schädigend
- Krebs erregend
- unbezahlbar
- usw. usw. usf.

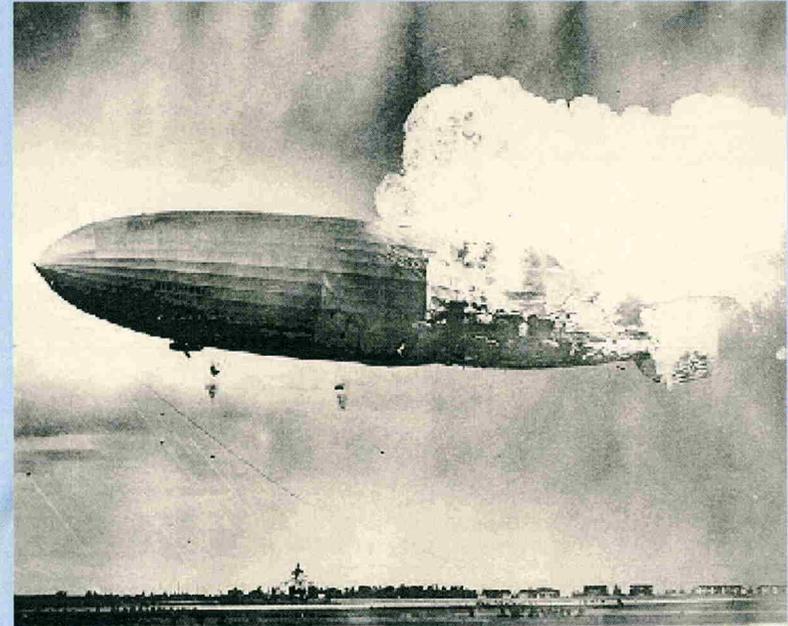
„Hindenburg“, Lakehurst, 6. Mai 1937 (1)

Ursache des Unglücks:
Anstrich der äußeren Hülle

- **schlecht leitfähig**
(Potentialdifferenzen bleiben)
- **extrem leicht brennbar**
(nicht zu löschen)

Lakehurst:

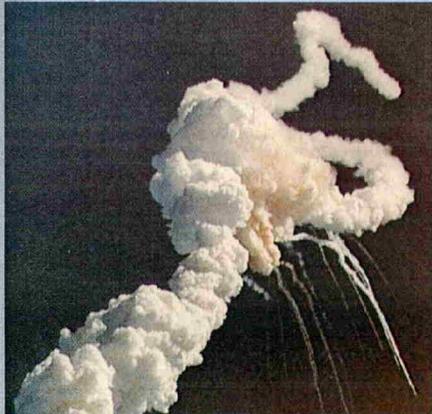
- gewittriges Wetter
- Potentialdifferenz Schiff-Boden
- Potentialdifferenz Schiff-Schiff
- Entladung (Funke)



Keine Explosion!

**Relativ wenige
Opfer**

„Challenger“, 28. Januar 1986



Ursache der Explosion, die zum Tod von sieben Astronauten führte, war eine **defekte Dichtung** in einer der Hilfsraketen (Festtreibstoff).

Eine seitlich aus der Rakete austretende Flamme (Pfeil) beschädigte Leitungen des Haupttanks (flüssiger Wasserstoff, flüssiger Sauerstoff). Es kam zum Leck und zur Zündung.



Der Hergang wäre bei einem anderen Tankinhalt genau der gleiche gewesen.

Kein Wasserstoff-Unfall!

Alkalische GroÙelektrolyse (N-Glomfjord)



Quelle: Norsk Hydro

Erdgasdampfreformer zur H₂-Erzeugung



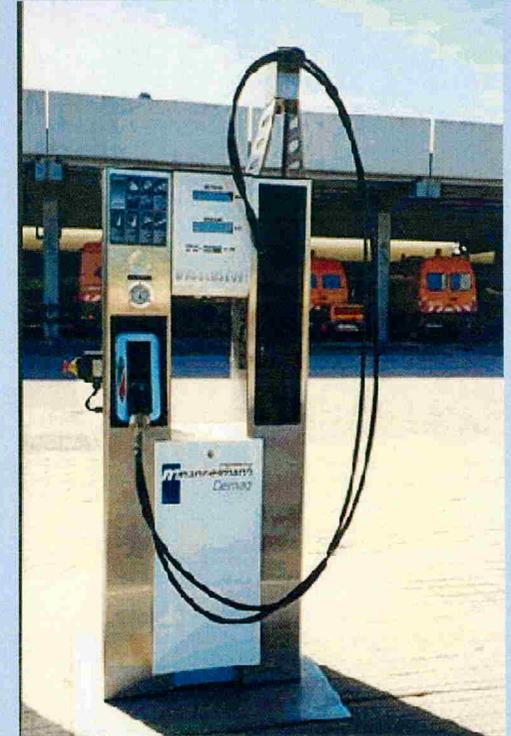
Quelle: KTI

L/CGH₂-Tankstelle Flughafen München



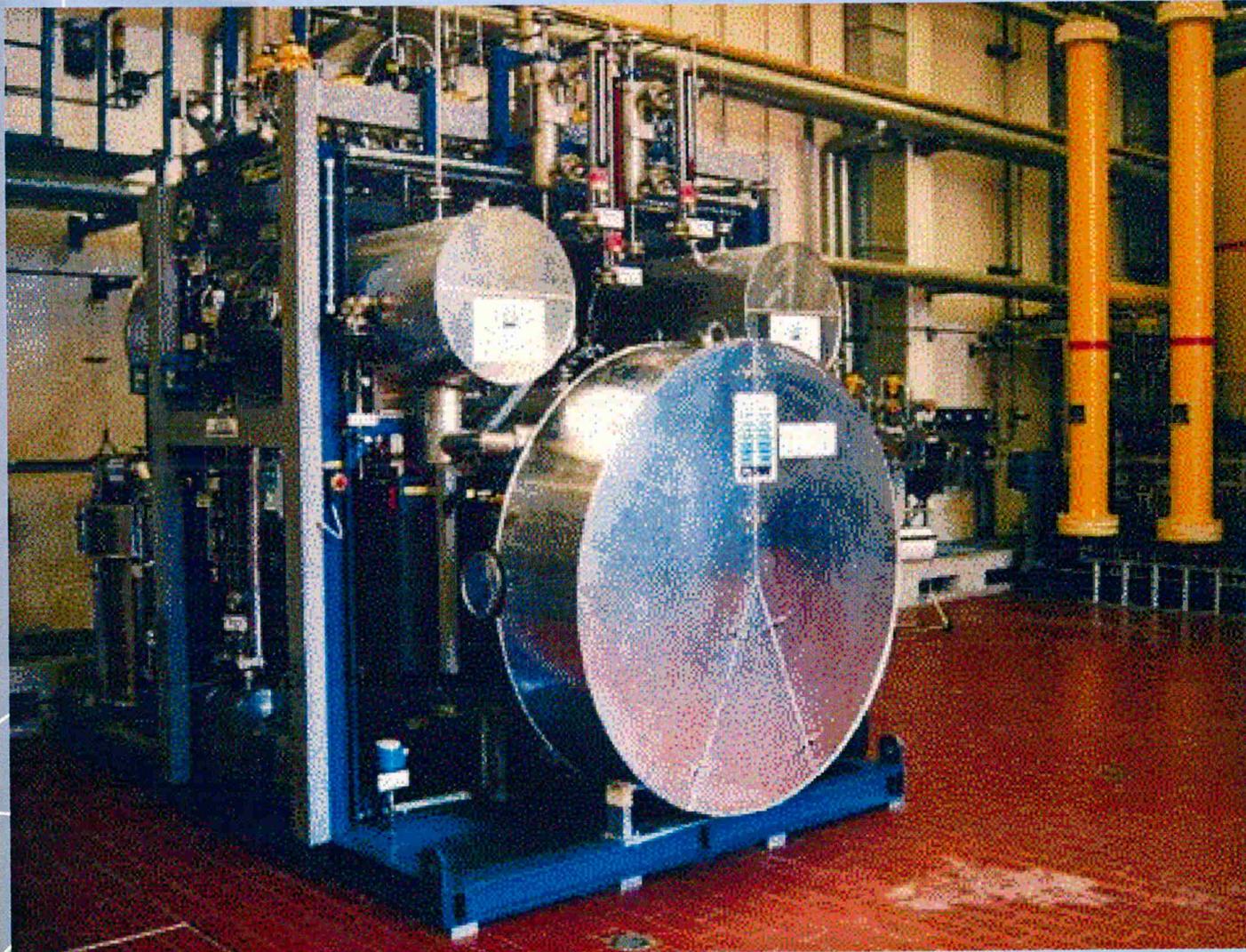
Quelle: FMG - H2MUC, 1999

CGH₂-Tankstelle in Hamburg



Quelle: HAWA +
LBST, 1999

Hochdruckelektrolyseur (100 kW_e, 3MPa)



Quelle: GHW/SWB

Brennstoffzellen-PKW



DaimlerChrysler:
Neca 5 (Berlin, 7.
11. 2000) Foto:
DaimlerChrysler AG

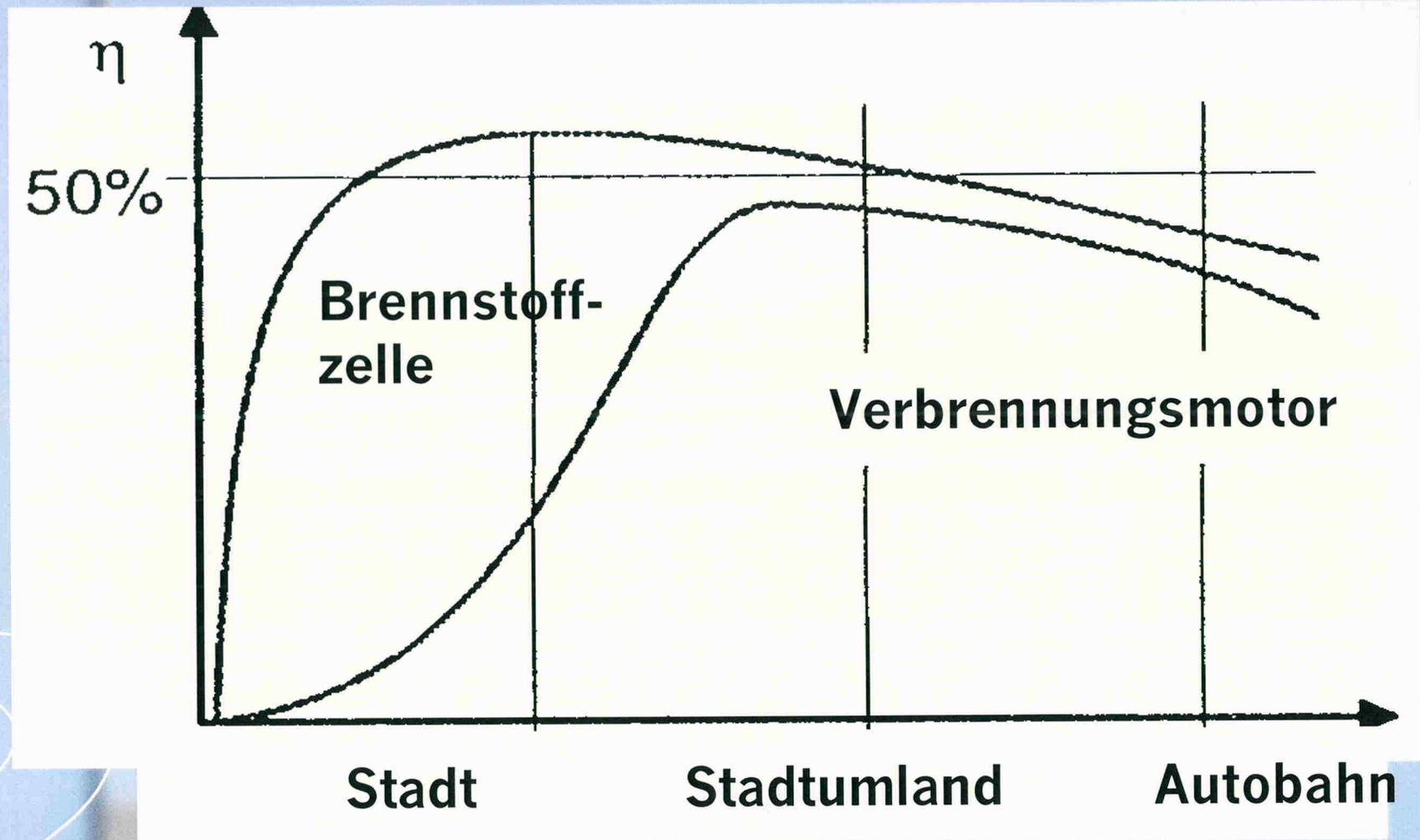


General Motors:
„Hydro-Gen 1“ bei den
Olympischen Spielen
2000 in Sydney (Foto:
Adam Opel AG)



Ford: „Focus“ mit
Brennstoffzelle (Berlin,
14. 2. 2001) Foto: DWV

Wirkungsgrad BZ / Verbrennungsmotor



Transport von LH₂ über See (Studien)



Barge Carrier für 8,000 t LH₂
Howaldtswerke-Deutsche Werft AG

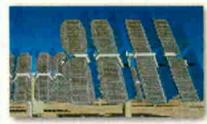


Barge Carrier für 1,000 t LH₂
Thyssen Nordsee Werke GmbH
[designed within EQHHPP]

Konzept einer Wasserstoff-Wirtschaft

Anwendungsschema Wasserstoff

Regenerativer Strom



Elektrolyse



Wasserstoff-Transport



Erdgasreformer



Biomassereformer



Mobile Anwendung



Wasserstoffspeicher



Chemie/ Industrie



Hausenergie



Brennstoffzellen BHKW



Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

Eine Übersicht der Technologien zur Wasserstoffbereitstellung

Robert Steinberger-Wilckens, PLANET – Planungsgruppe Energie und Technik
Pf. 4003, D-26030 Oldenburg, Tel. +49 (0)441-85051, Fax +49 (0)441-88057
e-mail r.steinberger@planungsgemeinschaft.de, www.euhyfis.com

Kurzfassung

Wasserstoff ist keine ‚neue Energiequelle‘ mit besonderen umweltrelevanten Eigenschaften, sondern ‚nur‘ ein Energievektor mit günstigen Verbrennungs- bzw. Umwandlungseigenschaften – nämlich einer rückstandslosen, emissionsfreien Verbrennung. Da er aus primären Energiequellen auf verschiedenen Wegen gewonnen werden kann, ist die Umwandlungskette von besonderer Bedeutung für die Gesamt-Emissions- und Ökobilanz von Wasserstoff als Energieträger.

In diesem Beitrag werden die Umwandlungstechnologien, die Handelsformen von Wasserstoff und die Emissions- und Effizienzbilanzen diskutiert.

Das Ende der fossilen Energiewirtschaft

Die heutigen Techniken der Energieversorgung basieren fast ausschließlich auf erschöpflichen Energiequellen, insbesondere kohlenstoffhaltigen Trägern wie Erdöl, Erdgas und Kohle. Ihre Verbrennung bzw. Umwandlung setzt unweigerlich Kohlendioxid frei. Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre – ob anthropogen oder nicht – und diverse andere Emissionen aus der Energiewandlung führen zu Veränderungen des Weltklimas, die eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit und der Umwelt allgemein bewirken.

Im Sinne eines vorausschauenden Wirtschaftens als Vorsorge für unsere eigenen Kinder und ihre Nachkommen ist es daher unerlässlich, die Wirtschaft kurz- und mittelfristig auf Energienutzungstechnologien umzustellen, die einerseits auf erneuerbaren Trägern beruhen, sich andererseits durch eine hohe Nutzungseffizienz auszeichnen. Dazu dienen regenerative Energiequellen ebenso wie hocheffiziente Wandlungstechniken. Dabei ist jedoch zu beachten, daß verschiedene Nutzungen auch unterschiedliche Ansprüche an den Exergiegehalt des eingesetzten Energieträgers stellen (Wärmebereitstellung, Licht, Kraft usw.) und auf der anderen Seite bestimmte Nutzungsformen auch dezidierte Anforderungen an Art und Form des Energieträgers stellen (insbesondere Treibstoffe).

Wasserstoff kommt vielen dieser Anforderungen entgegen. Insbesondere ist Wasserstoff, anders als fast alle anderen Energieträger, sowohl zur Wärmeerzeugung durch Verbrennung als auch zur direkten Stromerzeugung über Brennstoffzellen nutzbar. Da Wasserstoff elementar in der Natur praktisch nicht vorkommt, muß er jedoch aus anderen Energieträgern gewonnen werden – mit entsprechenden Umwandlungsverlusten. Ziel muß es nun sein, diese Energieträger und Umwandlungsketten so zu optimieren, daß insgesamt ein erheblicher Effizienzgewinn zur überkommenen Technik auf Basis fossiler Energiequellen verbleibt.

Wasserstoff-Energieträger

Wasserstoff ist ‚lediglich‘ ein Energie‚träger‘ (sogenannter ‚Vektor‘). Innerhalb der technisch heute bekannten und realisierbaren Umwandlungspfade wird er an den unterschiedlichsten Knotenpunkten zwischen Energieversorgung und Verbraucher aus anderen (Primär-) Energieträgern gewonnen – zentral oder dezentral. Die technische Lösung hängt im wesentlichen von der Art der Nutzung ab und wird sich zukünftig auch in Abhängigkeit von der Ausbildung einer Wasserstoff-Infrastruktur verändern.

Im wesentlichen wird Wasserstoff zur Verfügung gestellt in Form von

- elementarem Wasserstoff, gasförmig oder flüssig oder

- auf einem Kohlenstoff-Träger z.B. Methan, Methanol oder längerkettige Kohlenwasserstoffe oder
- auf anderen Trägern, z.B. Stickstoff (in Ammoniak).

Am Orte der Verwendung muß der Wasserstoff vom Träger durch eine Reformierung, Kväerner-Prozeß, katalytische Prozesse, partielle Oxidation o.ä. getrennt werden.

Die Entscheidung für die eine oder andere Form des Wasserstoffträgers fällt unter Speicherdichte- und Verfügbarkeitsgesichtspunkten. Ebenso wird die Frage entschieden, ob Wasserstoff zentral oder dezentral in gasförmiger oder flüssiger Form, oder sogar erst unmittelbar bei der Nutzung (als Zwischenprodukt), z.B. erst an Bord eines Fahrzeuges, gebildet wird. Flüssige Medien weisen sicherlich für den Transport günstige, höhere Speicherdichten auf, was in der Fahrzeugtechnik eine große Rolle spielt.

Wasserstoffherzeugung

Im wesentlichen kommen heute zwei Methoden der Wasserstoffbereitstellung zum Tragen, die Elektrolyse und die Reformierung von Kohlenwasserstoffen (auch Methanol).

1. Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird Wasser durch Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Elektrolyseure sind in jeder beliebigen Größe zu konstruieren und stellen insbesondere für Anwendungen mit geringem Wasserstoffbedarf und dezentraler Verwendung eine Option dar.

Der Wirkungsgrad beträgt ca. 70% [1] und hängt u.a. vom Betriebsdruck der Elektrolyse ab (zwischen wenigen bar und 30 bar).

Die Energie- und Ökobilanz des so gewonnenen Wasserstoffs hängt natürlich ganz entscheidend von der Herkunft des Stromes ab. Mit Netzstrom, z.B. aus dem deutschen Netz, hergestellter Wasserstoff ist in jeder Hinsicht fossilen Energiequellen unterlegen, während aus regenerativem Strom hergestellter Wasserstoff die geringste Umweltbelastung von allen Alternativen aufweist. Da, zumindest in industrialisierten Gebieten, Stromnetze überall zur Verfügung stehen, ist die Elektrolyse der Weg zu einer dezentralen Wasserstoffproduktion. Realisiert ist dies z.B. in der Wasserstofftankstelle EUHYFIS.

Kohlenstoff und Kohlendioxid (CO₂) treten nur mittelbar über den eingesetzten Strom in Erscheinung – theoretisch ist über regenerative Stromquellen eine völlig kohlenstofffreie Energiekette möglich.

2. Reformierung von Methan

Durch Wasserdampfzusatz bei hoher Temperatur wird in der Dampfreformierung aus Methan (CH₄) zunächst Wasserstoff und Kohlenmonoxid (CO) gebildet, welches dann in einer nachfolgenden Shift-Reaktion zu CO₂ umgesetzt wird. Das Gas muß dann in einer Absorptionsstufe gereinigt werden. Der Wirkungsgrad beträgt etwa 75% [1] und hängt im wesentlichen von der Größe der Anlage und der Nutzung der Abwärme ab (maximal bis zu 84%). Die Reformierung kann ebenfalls in verschiedensten Baugrößen realisiert werden, hat ihren höchsten Wirkungsgrad jedoch bei großen Hochdruckanlagen.

Naturgemäß wird bei diesem Prozeß CO₂ freigesetzt. Der Einsatz von Erdgas trägt zur Erschöpfung absehbar endlicher Energiequellen bei, da für Erdgas ca. 60 Jahre als Reichweite der bekannten Vorkommen angegeben werden. Inkl. vermuteter Vorkommen und heute nicht wirtschaftlich zu erschließender Quellen mag die Gesamtreichweite vielleicht 100 Jahre betragen. Einen Ausweg bietet hier nur der Einsatz von Biogas. Hier wird zwar auch CO₂

freigesetzt, dieses bewegt sich jedoch in einem kurz- bzw. mittelfristig geschlossenen Kreislauf.

Gegenüber dem direkten Einsatz von Erdgas/Biogas im Energieversorgungssystem kann Wasserstoff aus der Dampfreformierung nur dann energetisch Sinn machen (15 bis 25% Verlust in der Reformierung), wenn durch den Wasserstoff dann Energienutzungsformen erschlossen werden, die dem Erdgas nicht zur Verfügung stehen und höhere Wirkungsgrade bieten. Auf die Aspekte der Wasserstoffnutzung soll hier aber nicht weiter eingegangen werden. Die Bereitstellung von Erdgas stellt in vielen Regionen durch das ausgebaute Erdgasnetz kein Problem dar, so daß Wasserstoff auch mit der Erdgasreformierung dezentral überall hergestellt werden kann.

3. Methanol

Methanol wird ebenfalls in einem Reformier in Wasserstoff und CO₂ umgesetzt. Dies spielt insbesondere für Fahrzeuge und Kleingeräte und bei Anwendungen auf Inseln und in versorgungsnetzfernen Gebieten eine Rolle, die aus verschiedenen Gründen in einigen Regionen über Methanol verfügen. Insbesondere für Fahrzeuge und portable Anwendungen (kompakte, tragbare Geräte) werden auch Brennstoffzellen entwickelt, die Methanol direkt (ohne Reformierung) umsetzen.

Methanol muß zunächst aus Kohle oder Kohlenwasserstoffen, z.B. Erdgas, synthetisiert werden. Der Wirkungsgrad beträgt ca. 60% [2]. Auch hier kann der Gesamtwirkungsgrad durch Nutzung von Abwärme und Nebenprodukten verbessert werden. Ebenso wie beim Erdgaseinsatz wird CO₂ freigesetzt, zudem ist der Wirkungsgrad geringer als bei der Erdgasreformierung. Methanol hält sich daher in der Diskussion um die Wasserstoffversorgung nur aufgrund der Tatsache, daß es als flüssiger Energievektor eine hohe Speicherdichte aufweist und beim Aufbau der Betankungs-Infrastruktur für Fahrzeuge vermutlich nur geringe Umstellungsinvestitionen erfordert.

Die Ökobilanz hängt wiederum von den Kohlenwasserstoffquellen in der Synthese ab.

4. Biomassevergasung

Bei der Umsetzung von Biomasse in Vergaseranlagen wird ein Synthesegas gebildet, das einen hohen Anteil an Wasserstoff haben kann. Je nach Bauart des Vergasers und des eingesetzten Oxidationsmittels (Luft, Sauerstoff, Dampf) können der Wasserstoffgehalt und der Anteil an Methan, Kohlenmono- und -dioxid stark schwanken. Kritisch ist die Belastung des Gases mit Aschen, Staub, Chlor, Schwefel und langkettigen Kohlenwasserstoffen (Teer), so daß eine Aufbereitung nötig ist. Als Brennstoffe werden Holz, Holzabfälle, diverse Bio-Reststoffe bis hin zu Hausmüll und Klärschlamm eingesetzt.

Das Verfahren konkurriert zur Biogaserzeugung durch Vergärung und zur direkten thermischen Verwertung. Allerdings stellt es ein wasserstoffhaltiges Gas zur Verfügung, welches dann in einen Reformier oder auch direkt in eine geeignete Brennstoffzelle (Hochtemperaturzelle) geleitet werden kann. Insofern ist der relativ geringe Wirkungsgrad von ca. 32% [2] zu tolerieren. Die im Vergaser entstehende (Ab-)Wärme wäre gesondert zu nutzen.

Die CO₂-Bilanz ist aufgrund des Brennmaterials geschlossen, auch wenn dies bei der Verwertung von Holzabfällen und holzhaltigem Hausmüll nur im Bereich einiger Jahre bis 100 Jahre richtig ist.

Es gibt eine Vielzahl weiterer Methoden der Wasserstoffherzeugung [3], die heute in der Diskussion um die Wasserstoffbereitstellung unterschiedliche Rollen spielen. Die partielle Oxidation von Schwerölen und die Kohlevergasung (Steinkohle, Braunkohle, analog der oben

beschriebenen Biomassevergasung) stellen großtechnische Alternativen zu vorstehend diskutierten Verfahren dar. Diverse katalytische bzw. im Kreis zu führende Metall-Wasserstoff-Reaktionen (z.B. mit Zink) stammen eher aus der industriellen Verfahrenstechnik und führen dort zu einer Wasserstofferzeugung als Nebenprodukt, das z.T. bereits vermarktet wird. Zwei Methoden, die aus verschiedenen Gründen zukünftig wichtig werden könnten, sollen kurz erörtert werden.

Im Kværner-Prozeß werden in einem Lichtbogen Wasserstoff und reiner Kohlenstoff gebildet. Auch hier wird ein Kohlenwasserstoff vorausgesetzt, der dann auch die Ökobilanz bestimmt. Der Wirkungsgrad ist geringer als bei der Reformierung, jedoch wird der Kohlenstoff nicht oxidiert und liegt als elementarer Kohlenstoff vor. Damit ist die fossile Ressource zwar verbraucht, aber nicht in CO₂ umgesetzt.

Verschiedene Bakterien und Algen bilden unter Lichteinwirkung Wasserstoff. Der Umsatz ist gering, ein Wirkungsgrad kaum zu benennen. Dies ist aufgrund des minimalen Aufwandes jedoch nebensächlich. Sollte das geringe Verhältnis von gebildetem Wasserstoff zu benötigtem Volumen verbessert werden können, wäre dies eine kostengünstige und energieeffiziente, sowie CO₂-freie Quelle für Wasserstoff.

Wasserstoffinfrastruktur

Kurz soll hier auf die notwendige Infrastruktur für Wasserstoff eingegangen werden, da sie z.T., wie bereits oben angedeutet, die Wahl der Erzeugungstechnologie mit bestimmt. Auf die Unterschiede zwischen mobiler [4] und stationärer [5] Anwendung wird nur am Rande eingegangen.

Wasserstoff hat in gasförmiger Form eine geringe Energiedichte. Von daher ist der Oberflächen-Transport von Wasserstoff, z.B. per Lkw, selbst bei Drücken von 350 bar und mehr, möglichst zu vermeiden, da das Verhältnis von Transportenergie zu transportierter Energiemenge ungünstig ist. Denkbar wären für eine Flächenversorgung Wasserstoffpipelines, analog der Erdgasversorgung. Regional existieren solche Pipelines bereits, z.B. im Ruhrgebiet, in der Region Bitterfeld und in Belgien. Der parallele Aufbau eines Wasserstoffnetzes zum Erdgasnetz erscheint unwahrscheinlich. Eher würden Teile des Erdgasnetzes auf Wasserstoff umgestellt werden. Mit welcher Technik der eingespeiste Wasserstoff erzeugt würde, wäre für diese Verteilung unerheblich.

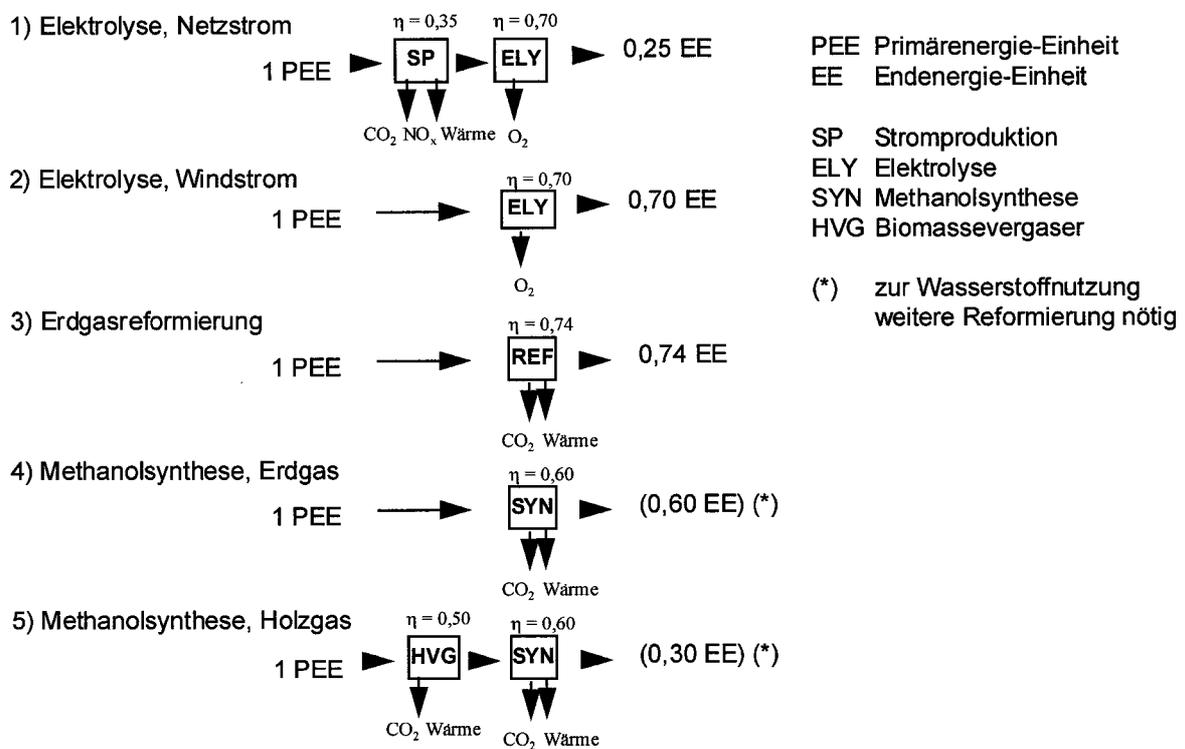
Verflüssigter Wasserstoff hat eine höhere Energiespeicherdichte, kann aber nur in Tanks transportiert werden. Dies begrenzt ihn auf die Versorgung von Tankstellen (für Kfz mit Flüssigwasserstoff-Tank) und die Industriegasversorgung. Gleiches gilt auch für Methanol, analog der heutigen Benzinversorgung.

Im stationären Bereich wird daher eher die dezentrale Umwandlung von Methan, das über die Erdgasleitungen transportiert wird, in Wasserstoff zur Anwendung kommen. Dies würde keine Veränderungen der Infrastruktur voraussetzen – zumindest in Regionen, die für Erdgas erschlossen sind.

Ähnlich verhält es sich mit der Elektrolyse, die z.B. für die Versorgung von Tankstellen dezentral eingesetzt werden könnte, da eine Stromversorgung in allen industrialisierten Regionen flächendeckend vorhanden ist.

Effizienz- und Ökobilanzen

Die Verwendung von Wasserstoff, z.B. im Zusammenhang mit Brennstoffzellen, genießt ein hohes öffentliches Ansehen. Dies rührt daher, daß diese Technologie als besonders umweltfreundlich und für den Klimaschutz förderlich eingestuft wird. Wie bereits oben angedeutet wurde, ist diese Beurteilung aber nicht für jede Erzeugungsform bzw. Anwendung von Was-



serstoff richtig. Von daher gebührt der Betrachtung der Ökobilanz besondere Aufmerksamkeit.

Abb. 1: Wandlungsketten verschiedener Wasserstoff-Bereitstellung. Die Ketten sind durch den Primärenergieeinsatz, ihre Wirkungsgrade und (angedeutet) wesentliche Emissionen gekennzeichnet. PEE und EE z.B. in kWh oder MJ.

Die Ökobilanzen von Wasserstoff-Wandlungsketten sind bereits verschiedentlich untersucht worden (z.B. [1], [2] und [6] bis [8]). Insgesamt kommt es nicht nur auf die Erzeugung des Wasserstoffs an, sondern auch auf die Nutzung. So kann der immanent zunächst geringere Wirkungsgrad der Wasserstoffproduktion (durch die Verluste der Umwandelungsschritte) im Vergleich zu konventionellen Energieträgern und Treibstoffen durch einen höheren Wirkungsgrad in der Nutzung, nämlich in Brennstoffzellen, mehr als wettgemacht werden. Hier soll jedoch nur die Bereitstellung an sich diskutiert werden.

Beispielhaft werden hier fünf Wandlungsketten für Wasserstoff analysiert. Die verwendeten Zahlenwerte geben dabei typische Kenndaten wieder, ohne sich dezidiert auf Ergebnisse von einzelnen technisch ausgeführten Anlagen zu beziehen, da hier die Schwankungsbreiten groß sind.

Abb. 1 zeigt die Wandlungskette für die Pfade:

1. Elektrolytisch gewonnener Wasserstoff aus deutschem Netzstrom (Stand 2000)
2. Elektrolytisch gewonnener Wasserstoff aus Windenergie
3. Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas
4. Methanol aus Erdgas
5. Methanol aus Holzgas

Es wird deutlich, daß die Erzeugung von Wasserstoff aus Netzstrom völlig kontraproduktiv zu umweltpolitischen Überlegungen ist. Die Nutzung von Erdgas schneidet energetisch etwa gleich gut wie die Elektrolyse mit regenerativem Strom (hier Wind) ab. Die Methanolsynthese fällt dagegen wegen des geringeren Wirkungsgrades ab. Die Ketten beginnen mit der Pri-

märenergiebereitstellung und enden mit der Wasserstoff- bzw. Methanolbereitstellung bei Atmosphärendruck, ohne Transport zur Verbrauchsstelle.

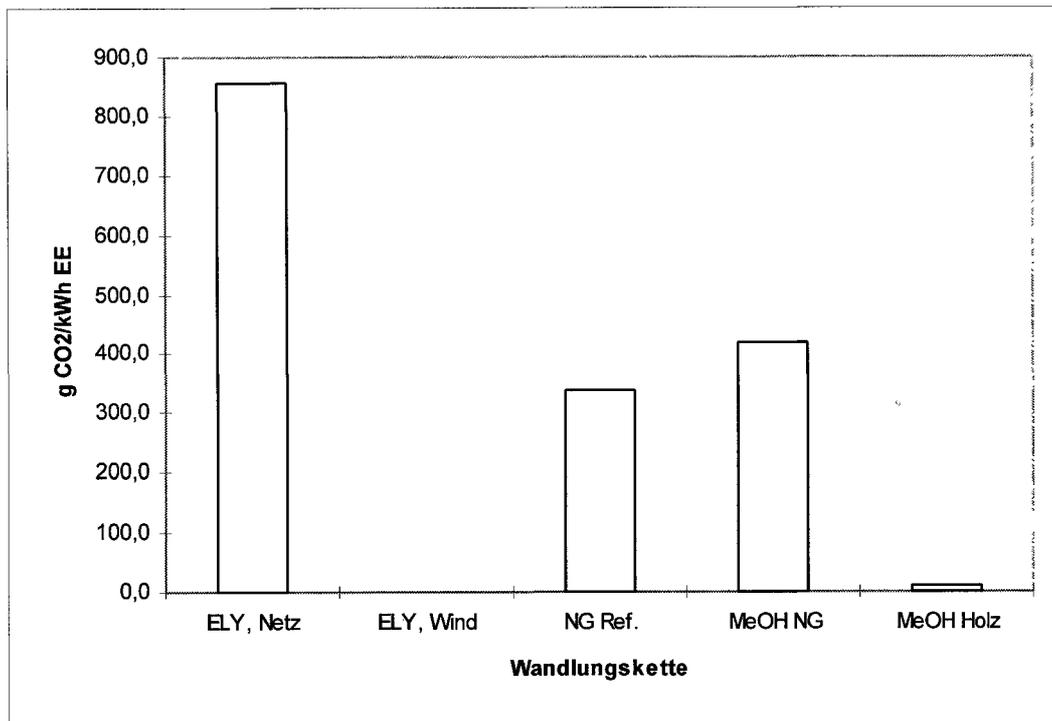


Abb. 2: CO₂-Emission pro kWh Endenergie über die in Abb. 1 und im Text definierten Wandlungsketten. Bei der Holzgasnutzung ist nur der Anteil der Emissionen aus dem Energieeinsatz in der Holzverarbeitung/Transport berücksichtigt, nicht der aus der Verbrennung.

Bei den Pfaden 4 und 5 muß berücksichtigt werden, daß der Wasserstoff zwar in Methanol gebunden vorliegt, über eine nachgeschaltete Reformierung gegebenenfalls (außer für die Direktmethanol-Brennstoffzelle) noch gewonnen werden muß, was die Effizienz nochmals senkt.

In dieser Darstellung wird nicht ersichtlich, welche CO₂-Belastung von den Wandlungsketten ausgeht. Unter Gesichtspunkten des Klimaschutzes können bei regenerativen, emissionsfreien Energiequellen gegebenenfalls niedrigere Wirkungsgrade in Kauf genommen werden. Dies macht die Bilanz in Abb. 2 deutlich. Die Emission von CO₂ kann hier auch synonym für den Verbrauch erschöpflicher Ressourcen gesehen werden. Eindeutig schneidet der regenerative Strom als Energiequelle für den Wasserstoff am günstigsten ab (die Emissionen sind ‚Null‘), gefolgt von dem allerdings energetisch ungünstigeren (vgl. Abb. 1) Holzgas. CO₂-Beiträge aus der Errichtung der Energiewandlungsanlagen selbst (‚graue‘ Energie) sind hier nicht berücksichtigt. Siehe hierzu die angegebenen Literaturstellen.

Über den konkreten Einsatz einzelner Energiequellen entscheidet letztlich die Verfügbarkeit, die technische Umsetzbarkeit und der Markt. Hier bleibt abzuwarten, inwiefern zukünftig Umweltgesichtspunkte und die Erschöpflichkeit von Ressourcen weiter in die Marktpreise einfließen werden. Erdgas wird sicherlich als einer der am weitestgehend und kostengünstig bereitzustellenden Medien die billigste Variante als Wasserstoffquelle darstellen, da der Eingangspreis für die Primärenergie etwa um den Faktor 2 bis 3 unter dem für Windenergie liegt.

Zusammenfassung

Die Bereitstellung von Wasserstoff kann auf verschiedensten Wegen und in unterschiedlicher Form erfolgen. Um den umweltpolitisch hoch angesiedelten Wert von Wasserstoff nicht zu untergraben, ist es jedoch notwendig, daß die Wanklungskette zum Wasserstoff einer Prüfung durch eine Ökobilanz standhält. Die Produktion von Wasserstoff aus fossilen Energiequellen macht nur unter Gesichtspunkten der kurzfristigen Verfügbarkeit und der Kosten Sinn. Jede Strategie, Wasserstoff als umweltfreundlichen und die natürliche und menschliche Umwelt schonenden Energieträger einzusetzen, muß auf Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen bauen.

Eine Infrastruktur zur Bereitstellung des Wasserstoffs an den Verbrauchsstellen fehlt noch weitgehend. Je nach Anwendung wird es künftig zum weiteren Ausbau der Gasversorgungsnetze auf Basis von Wasserstoff oder Methan (Erdgas/Biogas) kommen. Für einzelne Anwendungen, z.B. für Treibstoffe, wird auch die dezentrale Elektrolyse ihren Platz finden. Methanol wird sicherlich in der portablen Anwendung seine Rolle spielen, in anderen Bereichen wird erst die Zukunft verlässliche Abschätzungen möglich machen.

Literatur

- [1] Th. Feck: Ökobilanzierung unterschiedlicher Kraftstofflebenszyklen für Wasserstofffahrzeuge - Eine Analyse der technischen und ökologischen Dimensionen. Diplomarbeit, PLANET, Oldenburg, 2001.
- [2] TAB – Ausschuß f. Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages: TA-Projekt ‚Brennstoffzellen-Technologie‘. Bundestagsdrucksache 14/5054, Berlin, 2001.
- [3] N. Getoff: Wasserstoff als Energieträger. Springer-Verlag, Wien/New York, 1977.
- [4] R. Steinberger-Wilckens, K. Stolzenburg: Wasserstoff-Versorgungssysteme für den umweltfreundlichen, schadstoff-minimierten Fahrzeugverkehr. H₂-TEC, Heft 1/2000.
- [5] R. Steinberger-Wilckens: Perspektiven der Nahwärmeversorgung mit regenerativen Energiequellen. AGÖF-Kongreß Umwelt, Gebäude & Gesundheit’, Nürnberg, Sept. 2001.
- [6] J. Angloher, Th. Dreier: Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung. Perspektiven einer Wasserstoffwirtschaft Teil 1. WIBA Koordinierungsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern, München, Feb. 2000.
- [7] C. Hutter, Th. Kramer: Stationäre Anwendung von Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung. Perspektiven einer Wasserstoffwirtschaft Teil 2. WIBA Koordinierungsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern, München, Feb. 2000.
- [8] Th. Feck, D. Heinemann, R. Steinberger-Wilckens, K. Stolzenburg: Eco-Balances for Supply Paths of Hydrogen Fuels. Hypothesis IV Conference, Stralsund, Sept. 2001.



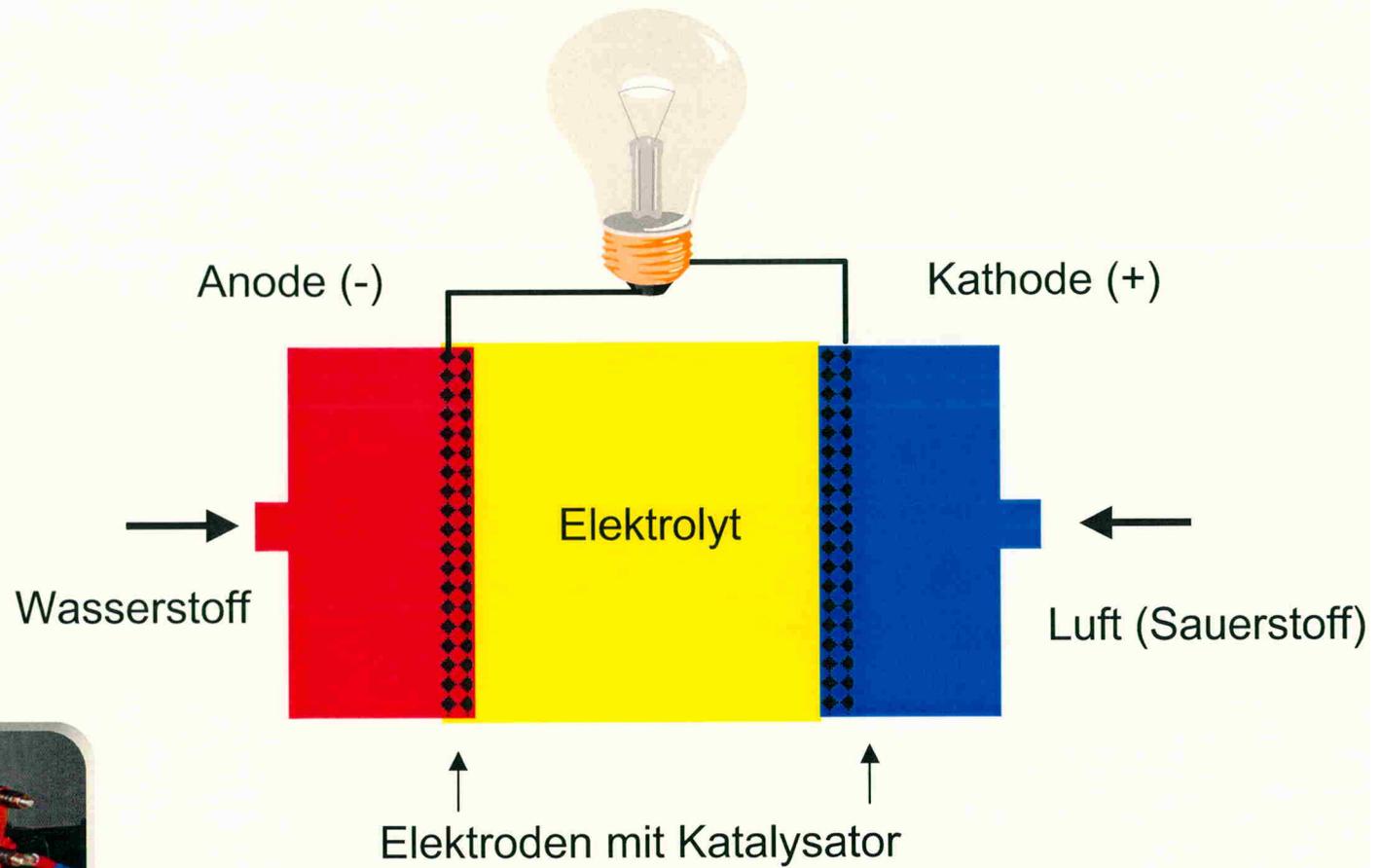
Brennstoffzellentechnologien

Werner Lehnert

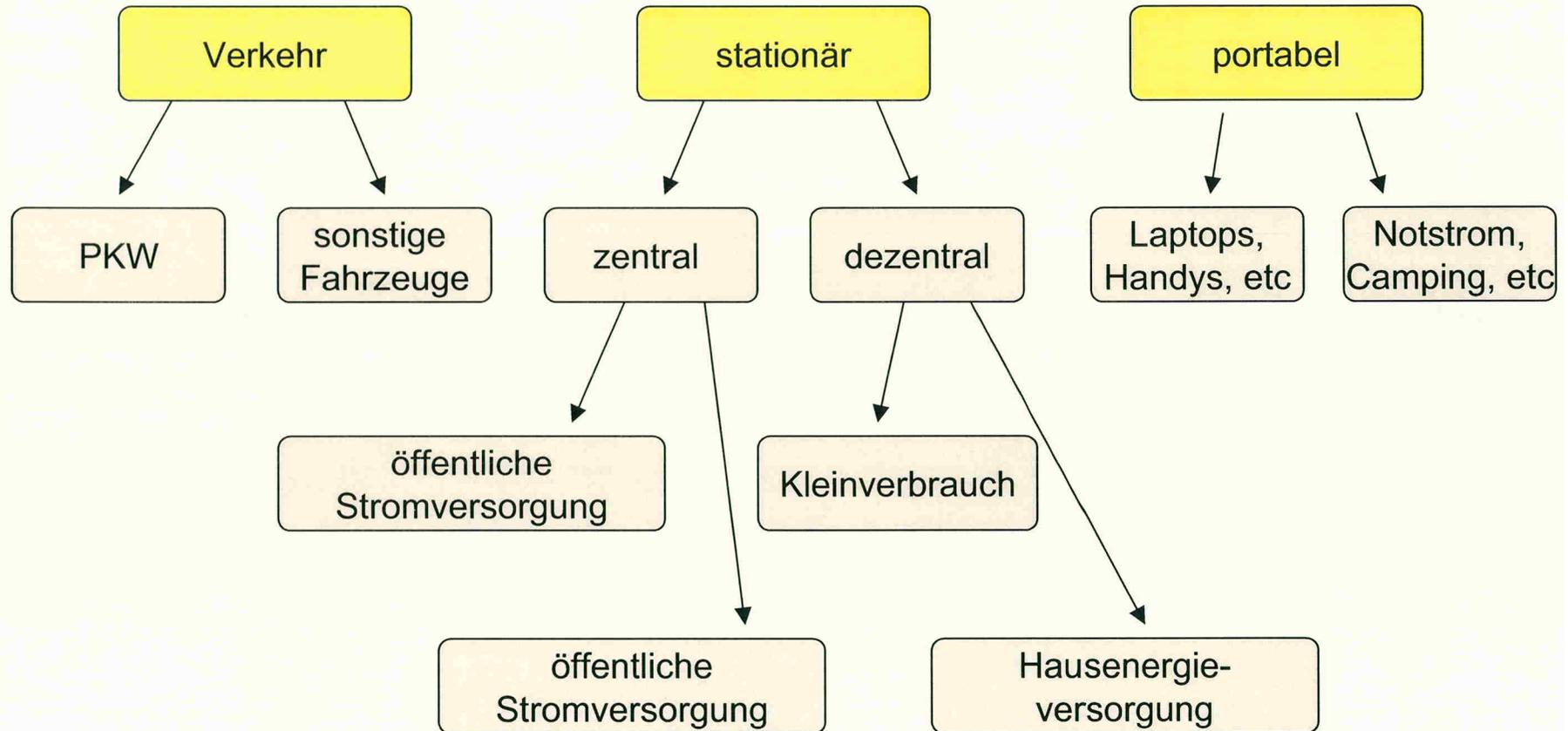
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg

13.11.2001
Innovationsforum
Rostock

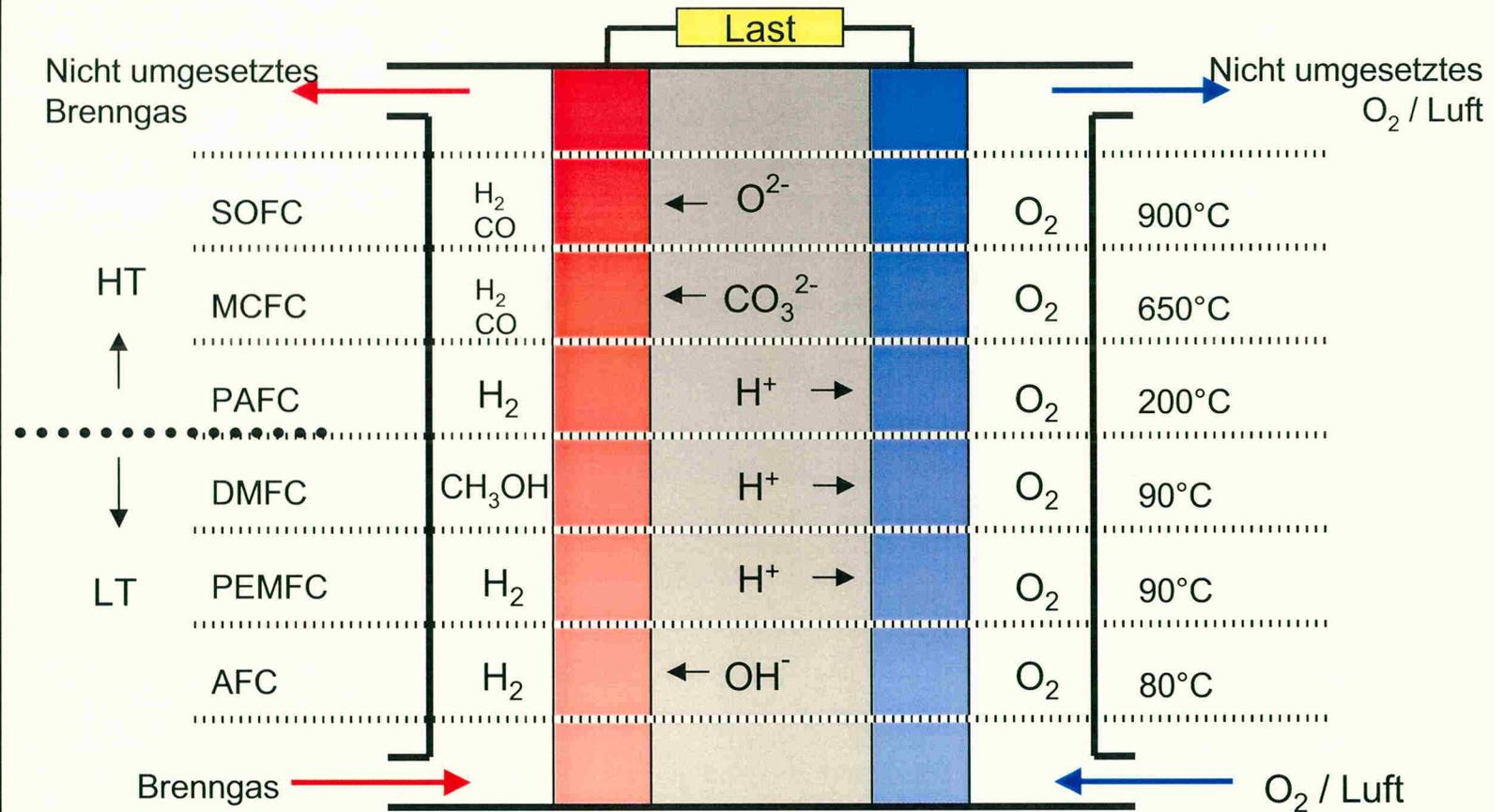
Prinzip einer Brennstoffzelle



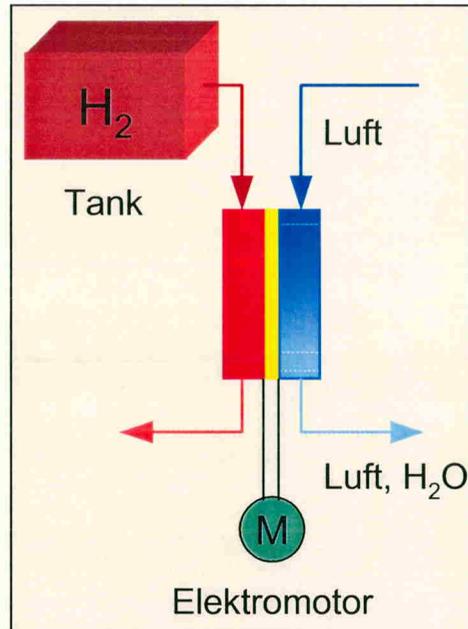
Einsatz von Brennstoffzellen



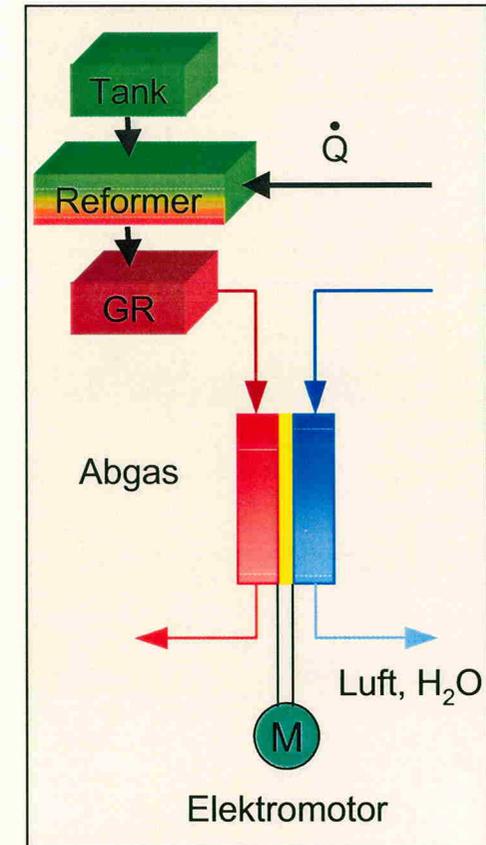
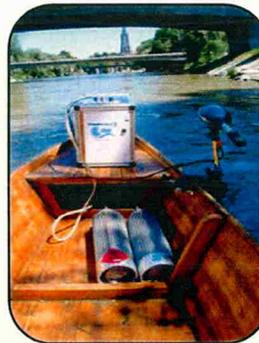
Brennstoffzellentechnologien



PEFC-Systeme



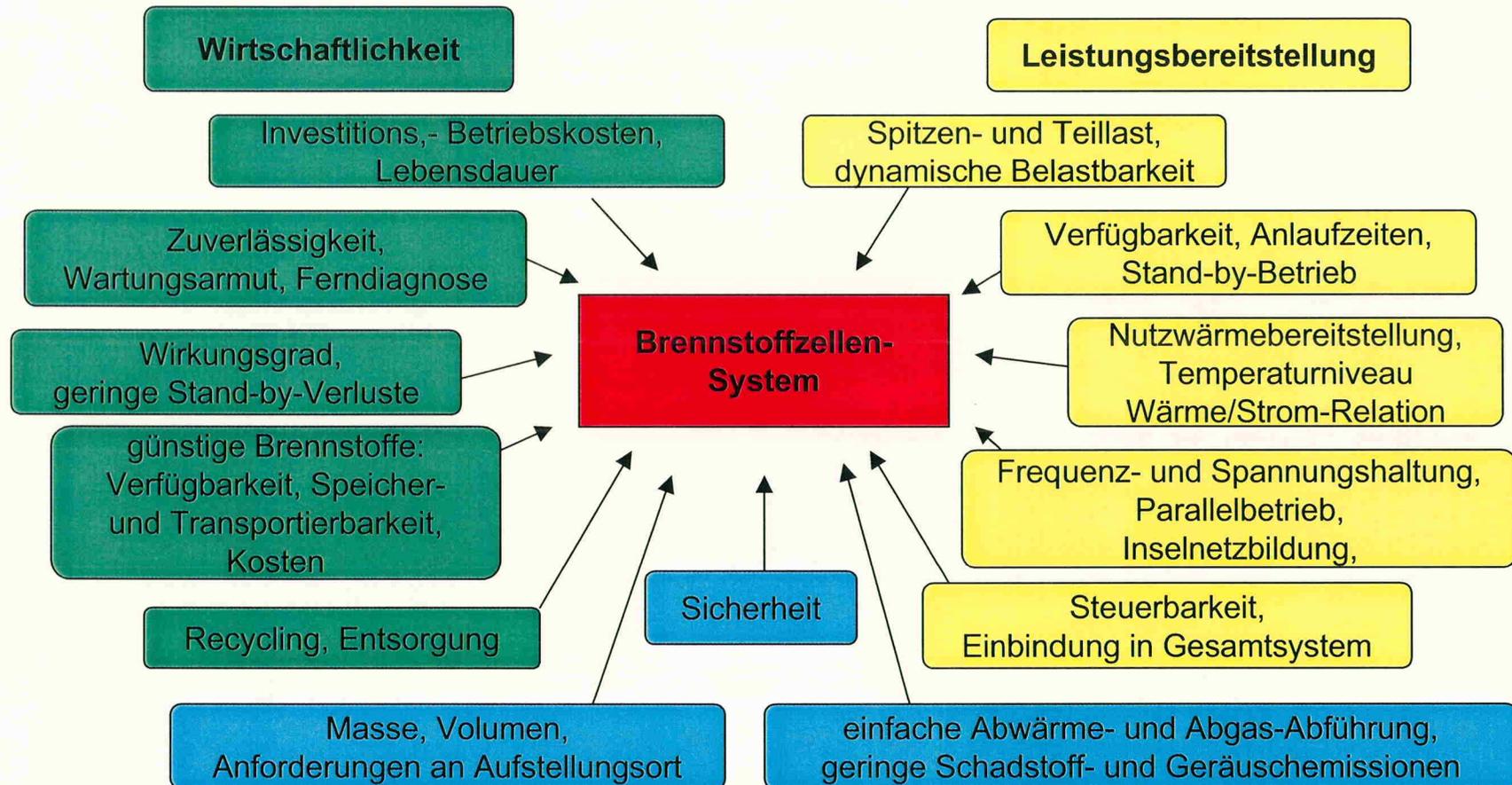
PEFC
mit H₂-Speicher



PEFC
mit Reformer

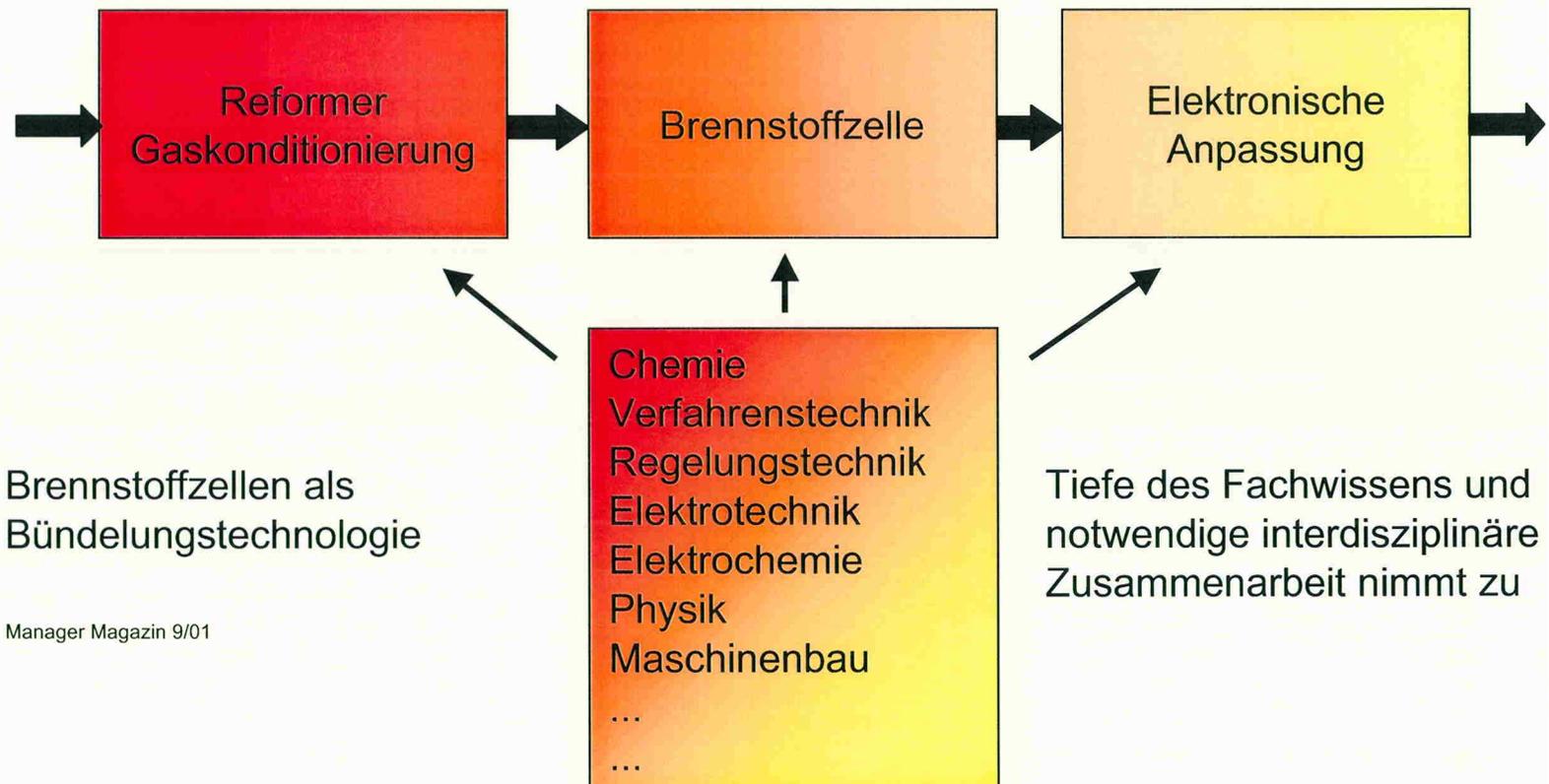


Anforderungen an Brennstoffzellensysteme



Quelle: In Anlehnung an ISET

Multidisziplinäres Arbeitsgebiet



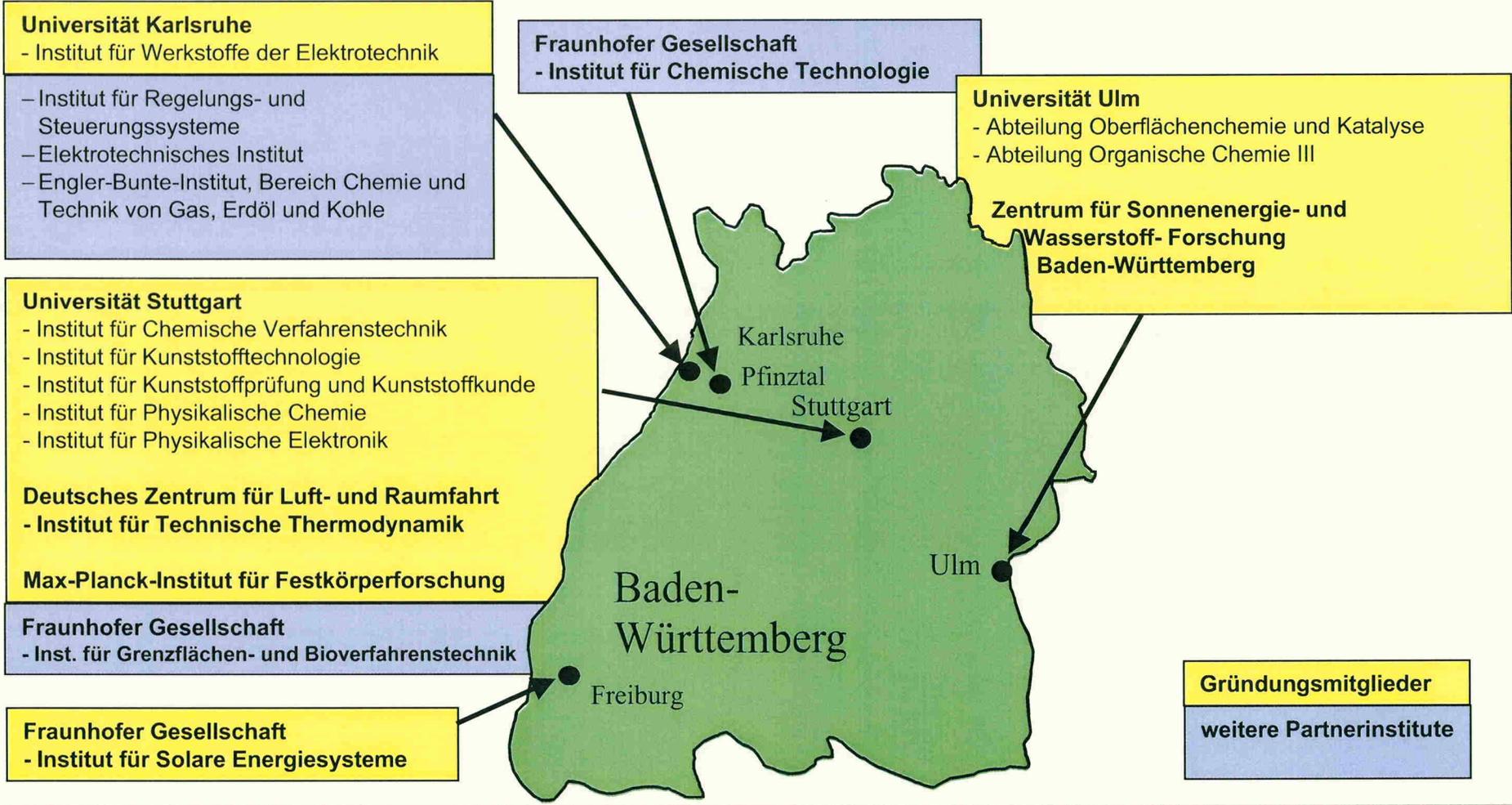
Forschungsallianz Brennstoffzellen Baden-Württemberg

- Gründung (MWK): 8.11.2000
- Priorisierung von Forschungsthemen 26.4.2001

Ziele der FABZ

- Bündelung der Ressourcen
- Koordinierung der Forschungsaktivitäten
- Stärkung des Technologietransfers in die Wirtschaft
- Produktions- und Forschungsstandort stärken

Partnerinstitute der FABZ



Forschungsschwerpunkte der FABZ

Brennstoffzellen-Typen: PEMFC (H₂ und Methanol), SOFC

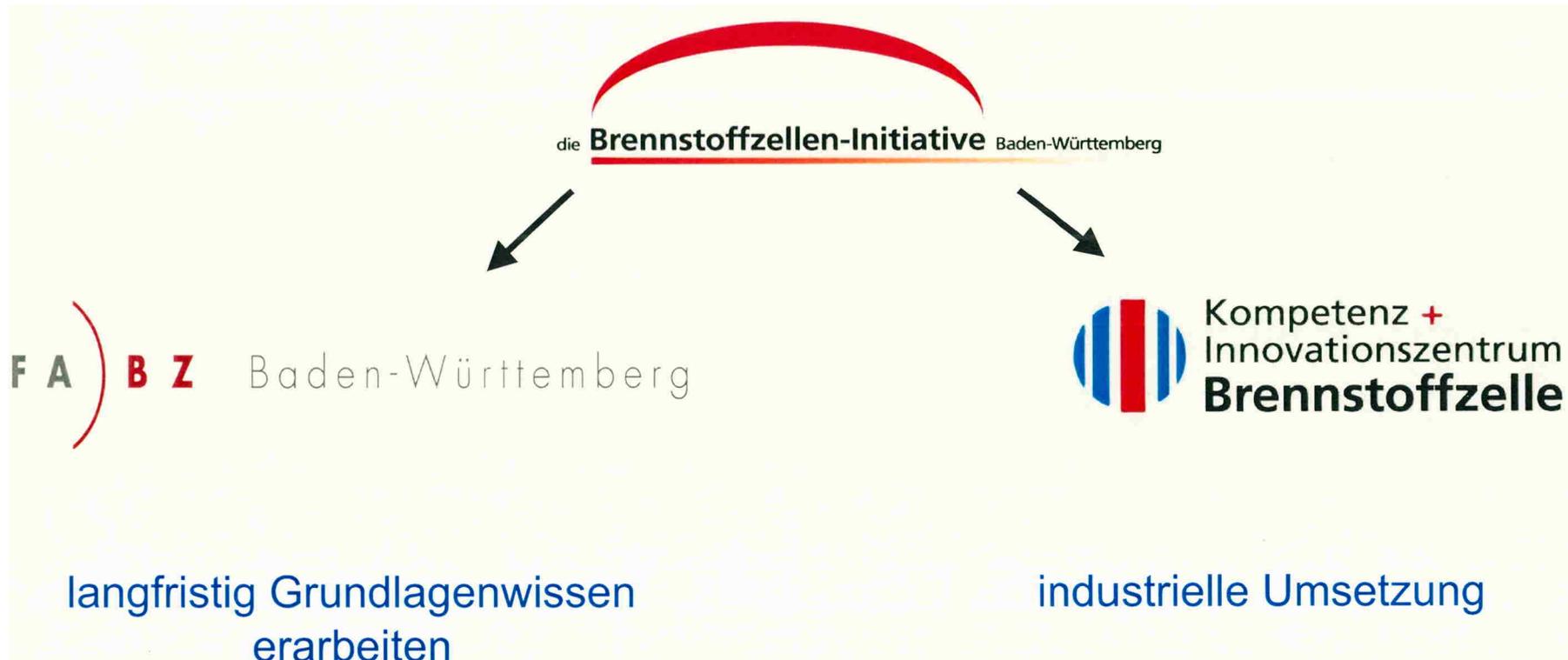
- Materialentwicklung für Brennstoffzellen
- diagnostische Methoden
- Modellierung von Brennstoffzellensystemen
- Brennstoffzellen Klein- und Kleinstsysteme
- Wasserstoffspeicherung

"Die öffentlich finanzierte Forschung unterstützt die Industrie bei der kurzfristigen Entwicklung innovativer Lösungen und erarbeitet langfristig orientiert neues Grundlagenwissen für fernere Zukunftsentwicklungen.

Schon weil die Mittel begrenzt sind, muss der Staat dafür Schwerpunkte setzen."

BDI-Positionspapier "Innovationspolitik für Deutschland – Maßnahmen in zukunftssträchtigen Feldern" vom September 1999

Stärkung des Forschungs- und Wirtschaftsstandorts Baden-Württemberg



TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg



Innovationsforum H₂ - Technologien

in

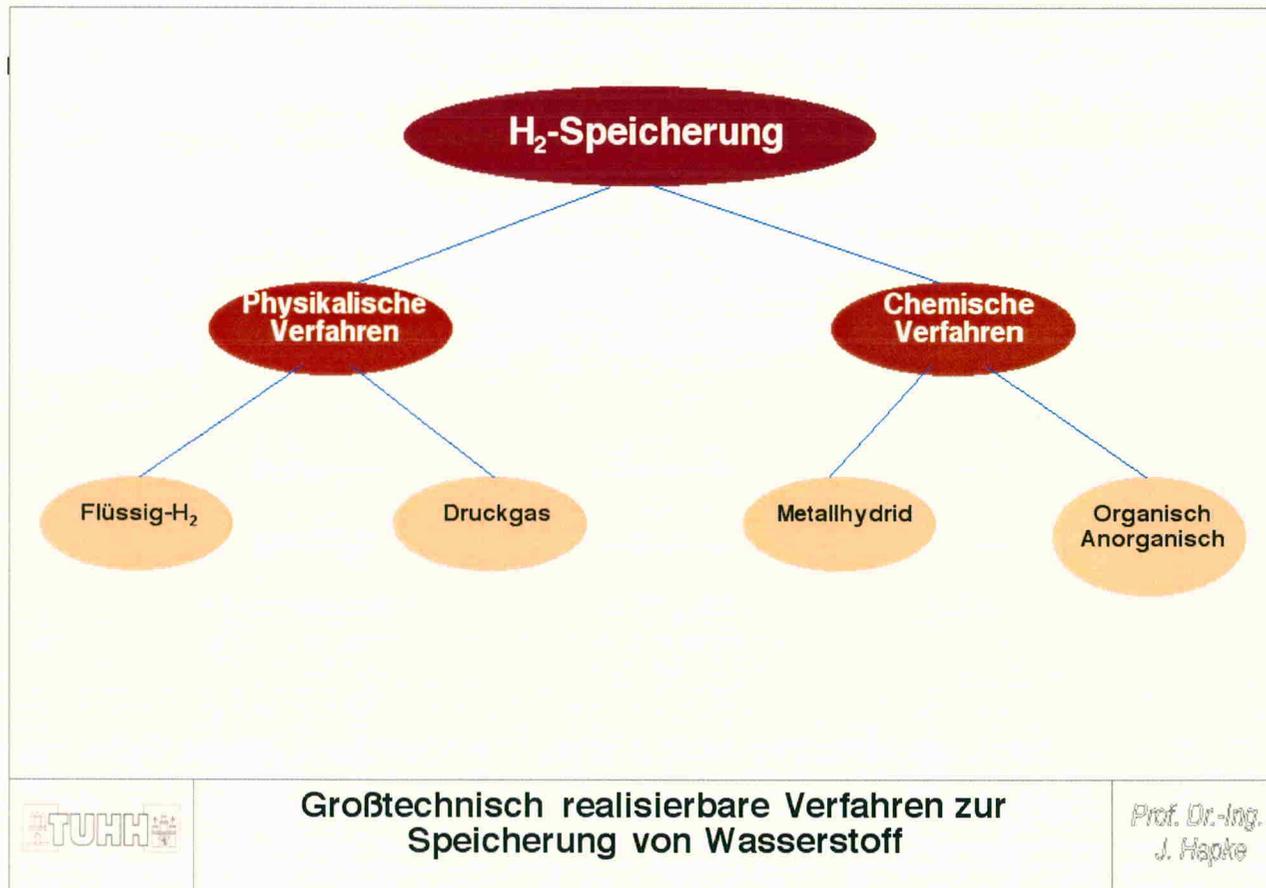
Mecklenburg - Vorpommern

Rostock, 13. November 2001

Vortrag von Prof. Dr.-Ing. Jobst Hapke

Technische Universität Hamburg - Harburg

Wasserstoffspeicherung



| Bezeichnung | Druck [bar] | Inhalt [m ³ H ₂] | Gewicht [kg] | Inv.-Kosten [DM] | Maße [mm] |
|---------------------|----------------|--|-----------------|---------------------|------------------------|
| Druckdosen | 12 | 0,005 .. 0,012 | | | |
| 0,385 l-Flasche | 150 | 0,054 | | | |
| 1 l-Flasche | 200 | 0,18 | 2,0 | | 370 x 80 |
| 2 l-Flasche | 200 | 0,35 | 5,3 | | |
| 10 l-Flasche | 200 | 1,8 | 16 | 348 | 970 x 140 |
| 50 l-Flasche | 200 | 8,9 | 61,68 | 646 | 1 640 x 229 |
| Flaschenbündel (12) | 200 | 107 | 1 066 | 11 402 | 1 650 x 760 x 1 260 |
| Flaschenbündel (28) | 200 | 250 | 2 490 | 30 000 | |

TUHH

Speicherung von H₂ und O₂
für alternative Energieversorgungssysteme

Prof. Dr.-Ing.
J. Hake

Components

Liner pressure vessel

It is made of oil-quenched and tempered chromium-molybdenum steel with good toughness, and has an excellent surface finish.

A computer-controlled production process ensures consistently high quality, as demonstrated by the excellent service record of the millions of steel cylinders supplied so far.

The pressure vessels are manufactured in compliance with requirements of relevant national and international regulatory bodies and of the quality assurance systems standard ISO 9001.

Openings and connections

They are suitable for all conventional or standardized systems.

Openings and connections

Overwrap

Overwrap

It consists of a thermoplastic matrix reinforced with the revolutionary aramid fibre exhibiting a specific tensile strength (tensile strength/density) which is almost 10 times that of the steel. This composite is well-established in the aerospace industry.

The overwrapping of the liner vessel is controlled and documented by an integrated, computer-assisted quality control system.

Liner pressure vessel

Openings and connections

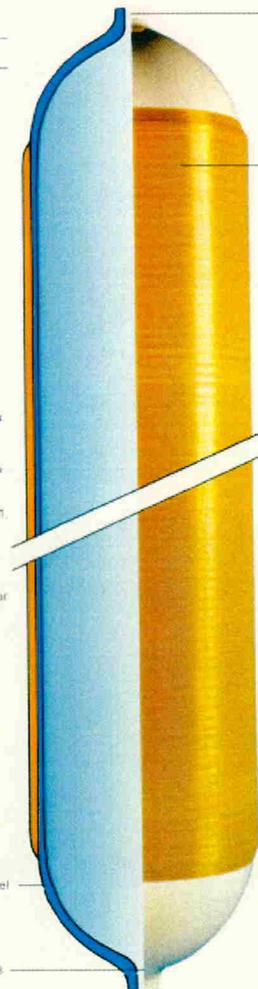
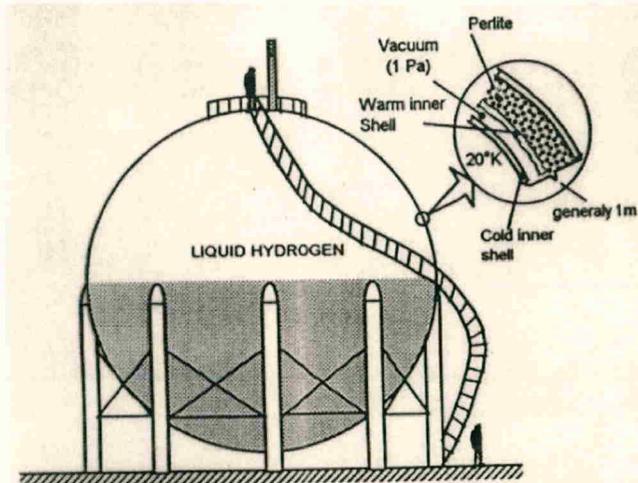


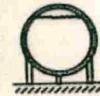
Figure: Mannesmann Stahlflaschen GmbH, Düsseldorf



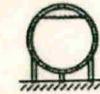
| Capacity in m ³ | Type of Insulation | Boil off/Day |
|----------------------------|--------------------|--------------|
| 3400 | Vacuum-Perlite | 0.03% |
| 380 | Vacuum-Perlite | 0.18% |
| 110 | Vacuum-Perlite | 0.80% |
| 760 | Vacuum-Multilayer* | 0.07% |
| 50 | Vacuum-Multilayer* | 0.22% |

* Pressure 10⁻² Pa

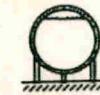
NASA Kennedy Space Centre
Cape Kennedy
-Capacity 3800 m³
-Vacuum-perlite insulation
-Boil off rate <0.03% per day



NASA
Washington, D.C.
-Capacity 3400 m³



Air Products
Sarnia, Ontario, Canada
-Capacity 3200 m³



NASA and US Atomic Energy
Nuclear Rocket station Nevada
-Capacity 2000 m³



Air Products and Chemicals Inc.
Long Beach, California
-Capacity 340 m³



Los Alamos Scientific Laboratory
University of California
-Capacity 189 m³
-3 ft thick perlite insulation



Large-industrial LH₂ storage systems

Prof. Dr.-Ing.
J. Hapke

| Capacity | | Perfor. Normal eva. rate [%/d] | Dimensions & Pressure Ratings | | | | |
|--|-------------------------|---|-------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Volume [l] | Useful Volume [l] | | Diameter [mm] | Height [mm] | Working Pressure [bar] | Empty Weight [kg] | Full Weight [kg] |
| Portable liquid hydrogen dewar | | | | | | | |
| 34,6 | 30 | 3,75 | 508 | 1178 | | 57 | |
| 68,7 | 60 | 1,75 | 610 | 1273 | | 75 | |
| 114 | 100 | 1,2 | 610 | 1479 | | 86 | |
| 285 | 250 | 1,0 | 813 | 1711 | | 168 | |
| 368 | 350 | 1,0 | 813 | 1854 | | 149,7 | |
| 550 | 500 | 1,0 | 1067 | 1759 | | 245 | |
| Tanks with composite insulation and vacuum | | | | | | | |
| 6238 | 5678 | 0,9 | 1829 | 4953 | 11 | 4128 | 4530 |
| 12078 | 11234 | 0,85 | 2438 | 4800 | 11 | 5795 | 6590 |
| 17790 | 16544 | 0,75 | 2438 | 6731 | 11 | 9916 | 11087 |
| 23077 | 21461 | 0,70 | 2438 | 8915 | 11 | 9980 | 11498 |
| 36715 | 34144 | 0,65 | 2438 | 12040 | 11 | 17010 | 19427 |
| 44769 | 41635 | 0,60 | 3048 | 9830 | 11 | 19229 | 22176 |
| 61010 | 57343 | 0,50 | 3048 | 12852 | 11 | 28350 | 32409 |
| Tanks (for hydrogen pumping) with composite insulation and vacuum | | | | | | | |
| 11964 | 11128 | 0,95 | 2438 | 6502 | 10,3 | 3452 | 8397 |
| 23077 | 21461 | 0,80 | 2438 | 9677 | 10,3 | 10660 | 12176 |
| 36715 | 34144 | 0,70 | 2438 | 14300 | 10,3 | 17464 | 19880 |
| 46082 | 43702 | 0,65 | 3048 | 11430 | 10,3 | 19728 | 22821 |
| 59678 | 56090 | 0,55 | 3048 | 14249 | 10,3 | 28804 | 32774 |

Source: MVE, Inc. (Internet: <http://www.mve-inc.com/indgas/>)

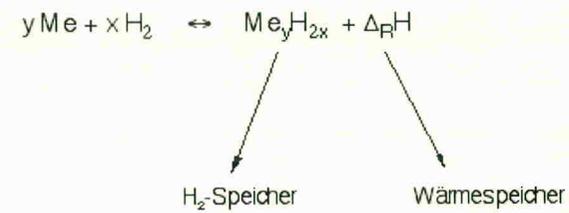




CryoPlane

Prof. Dr.-Ing.
J. Hapke

Bildungsreaktion



Einteilung

- Tieftemperaturhydride: $T_{(p_k = 1 \text{ bar})} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mitteltemperaturhydride: $100 \text{ }^\circ\text{C} < T_{(p_k = 1 \text{ bar})} < 200 \text{ }^\circ\text{C}$
- Hochtemperaturhydride: $T_{(p_k = 1 \text{ bar})} > 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Betriebsbedingungen

$$\begin{aligned} -80 \text{ }^\circ\text{C} < T < 600 \text{ }^\circ\text{C} \\ 10^{-8} \text{ mbar} < p < 200 \text{ bar} \end{aligned}$$

| | TTH | MTH | HTH | |
|--|-------------------|-----------|-------------------|----------------------------|
| Temperatur bei $p_{H_2} = 1 \text{ bar}$ | -30...+50 | 100...200 | ≥ 200 | [°C] |
| Max. H ₂ -Kapazität | 2 | 2,5 | 7,5 | [Massen-% H ₂] |
| Reaktionsenthalpie | ≤ 30 | 30...60 | ≥ 75 | [kJ/molH ₂] |
| Energiedichte | | | | |
| • gewichtsbezogen | 2,4 | 3 | 9 | [MJ/kg] |
| • volumenbezogen | $8,4 \cdot 10^3$ | - | $6,75 \cdot 10^3$ | [MJ/m ³] |
| Wärmespeicherdichte | | | | |
| • gewichtsbezogen | 0,3 | 0,75 | 3 | [MJ/kg] |
| • volumenbezogen | $1,05 \cdot 10^3$ | - | $2,25 \cdot 10^3$ | [MJ/m ³] |



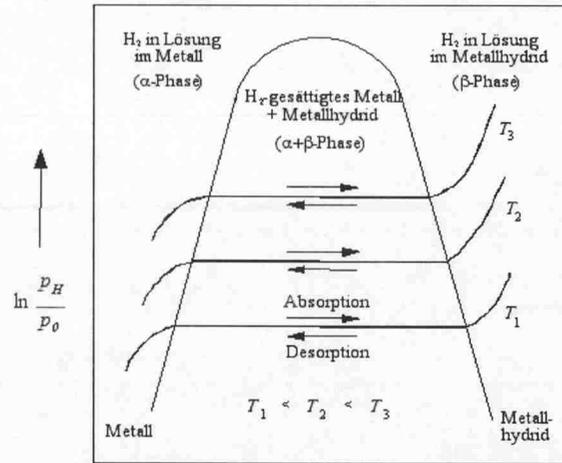
Metallhydride

Einteilung in Tief-, Mittel- und Hochtemperaturhydride

Prof. Dr.-Ing.
J. Hapke

Ideale Konzentrations-Druck-Isotherme

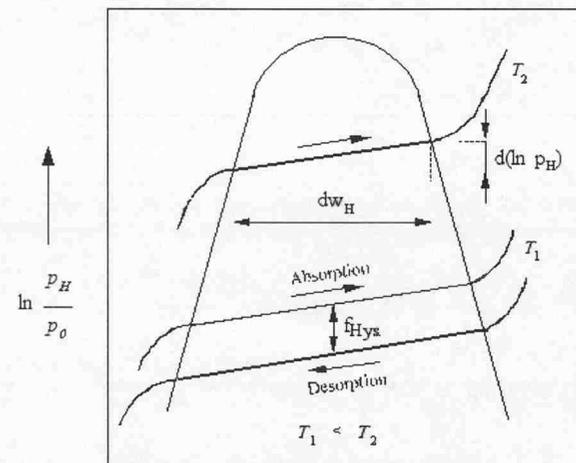
H₂-Gleichgewichtsdruck



H₂-Massenbeladung w_H

Reale Konzentrations-Druck-Isotherme

H₂-Gleichgewichtsdruck



H₂-Massenbeladung w_H



Metallhydride
Konzentrations-Druck-Isothermen

Prof. Dr.-Ing.
J. Hapke

| Speicher | Energiedichte | |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| | incl. Behältermasse [Wh/kg] | incl. Behältervolumen [Wh/l] |
| Benzintank | 10.000 | |
| Methanoltank | < 5.600 ¹ | < 4.400 ¹ |
| Wasserstoffbehälter | | |
| LH ₂ ² | 1583 | < 2141 |
| GH ₂ ³ | 456 | < 557 |
| MH | 308 ⁴ ...797 ⁵ | 957 ⁴ ...1.667 ⁵ |
| Sekundärbatterien | | |
| Ni-Cd | 20...44 | 40...80 |
| Pb | 20...> 45 | 60...95 |
| Ni-MH ⁶ | 48...61 | = 180 |
| Li-Ionen ⁷ | 120 | 250 |

¹ exklusive Behältermasse bzw. -volumen

² LH₂-Tank für MAN Stadtlinienbus SL ($V_{\text{Tank}} = 210\text{l}$, $V_{\text{verfügb.}} = 190\text{l}$, $m_{\text{Tank}} = 284\text{kg}$),
volumenspezifische Kapazität exklusive der thermischen Isolierung

³ Druckgasflasche ($V = 50\text{l}$, $m = 61\text{kg}$, $p = 200\text{ bar}$, $T = 15^\circ\text{C}$)

⁴ Daimler Benz ($m_{\text{Tank}} = 80\text{kg}$, Ti, Zr, Y, Fe, Cr, Mn, ... $m_{\text{Wasserstoff}} = 62\text{kg}$)

⁵ MPI Mülheim a.d. Ruhr ($m_{\text{Tank}} = 14,5\text{kg}$, Mg(283Ni), $m_{\text{Wasserstoff}} = 26\text{kg}$)

⁶ Wasserstoffaufnahmelegierungen: LaNi₅, TiNi₂Cr₂, MnNi₅

⁷ Markteinführung für das Jahr 2000 erwartet

| | Flüssig-H ₂ | H ₂ -Druckgas | Metallhydrid | |
|--------------------------|--|--|---|----------------------------------|
| Speicherkapazität | | | | |
| • massenbezogen | | | | |
| excl. Behältermasse | 100 | 100 | 1,5...7 | Massen-% H ₂ |
| incl. Behältermasse | 4,75 ¹ca. 16 ² | 0,885 ³1,4 ⁴ | 0,93 ⁵2,4 ⁶ | Massen-% H ₂ |
| • volumenbezogen | | | | |
| excl. Behältervolumen | 71 | 3,8 ³16,7 ⁴ | 50 ⁶95 ⁵ | kgH ₂ /m ³ |
| incl. Behältervolumen | 64,24 ¹67,45 ² | < 3,8.....<16,7 | 28,7 ⁵50 ⁶ | kgH ₂ /m ³ |

Bemerkungen:

¹: LH₂-Tank für MAN-Stadtlinienbus (V_{Tank} = 210 l, V_{H₂max.} = 190 l, m_{Leer} = 284 kg)

²: Stationärer LH₂-Behälter (V_{Tank} = 68 m³, V_{H₂max.} = 0,95*V_{Tank}, T = -250°C, p_{max.} = 12 bar)

³: GH₂-Druckbehälter (V_{Tank} = 95 m³, m_{Tank} = 40,2 t, p = 50 bar, T = 15 °C)

⁴: GH₂-Druckgasbehälter (Stahlflasche: V_{Zylinder} = 50 l, m_{Zylinder} = 61 kg, p = 200 bar, T = 15 °C)

⁵: Daimler Benz: 80 kg Ti_{0,06}Zr_{0,02}V_{0,48}Fe_{0,06}Cr_{0,06}Mn_{1,5} (H₂-Flottentest Berlin)

⁶: Max Planck Institut für Kohlenforschung, Mülheim a.d. Ruhr (14,5 kg Mg(2%Ni))



**Kapazitäten der wichtigsten Verfahren
zur Speicherung von Wasserstoff**

Prof. Dr.-Ing.
J. Hapke

Verbrennungskraftmaschinen im Wasserstoffbetrieb

Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried. Bludszweit
MET Motoren- und Energietechnik GmbH
Rostock

Inhalt

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Problembeschreibung..... | 2 |
| 2 | Zielstellung..... | 3 |
| 3 | Lösungsweg..... | 4 |
| 3.1 | Allgemeine Vorgehensweise..... | 4 |
| 3.2 | Nachprüfung einiger Ansätze..... | 5 |
| 3.3 | Entwurfsarbeiten | 6 |
| 3.4 | Untersuchung der Strömungs-, Gemischbildungs- und Verbrennungsvorgänge mit Hilfe virtueller Modelle..... | 8 |
| 4 | Zusammenfassung und Schlußfolgerungen | 19 |
| 5 | Literaturverzeichnis | 21 |

1 Problembeschreibung

Die Weltenergiewirtschaft wird durch die fortgeschrittensten Industriestaaten dominiert. Sie ist sowohl quantitativ als auch qualitativ an einem Punkt ihrer Entwicklung angelangt, an dem Alternativfragen äußerste Dringlichkeit besitzen.

Die Bereitstellung der Energie basiert hauptsächlich auf fossilen Quellen. Bei diesen Quellen tritt zunehmend ihre natürliche Begrenztheit in die Diskussion, und die Abprodukte haben wesentlichen Anteil an der Belastung der Umwelt. Das Kohlendioxid verursacht den Treibhauseffekt in der Atmosphäre, die Stickoxide wirken toxisch auf die Natur. Gegenwärtig werden auf der Erde etwa 22 Mrd. Tonnen Kohlendioxid pro Jahr¹ produziert, von denen die Natur nur einen Bruchteil aufnehmen kann.

Als alternative Energiequellen, welche den Forderungen nach Umweltfreundlichkeit und zeitlich unbegrenzter Verfügbarkeit gerecht werden, stehen aus heutiger Sicht die Sonnenenergie, die Wind und die Wasserkraft zur Verfügung.

Diese drei Ressourcen besitzen die gemeinsame Eigenschaft, daß sie in erprobten Anlagen in die bequem verwertbare elektrische Energie umgewandelt werden können. Die elektrische Energie ist jedoch nicht direkt speicherbar und auf große Entfernungen, beispielsweise transatlantisch, nicht transportierbar. Unterschiede bestehen in den Aufwendungen je Energieeinheit sowie im Transport und in der Speicherung der einzelnen Energieträger. Der Wasserstoff ist als Energieträger besonders geeignet. Er erfüllt gleichzeitig den Aspekt der Umwandelbarkeit in die Bedarfsenergieformen Elektrizität, mechanische Energie oder Wärmeenergie und den Aspekt der Umweltverträglichkeit. Wasserstoff läßt sich aus dem unbegrenzt zur Verfügung stehenden Umweltbestandteil Wasser mittels der aus alternativen Quellen anfallenden elektrischen Energie durch Elektrolyse erzeugen. Bei seiner Verbrennung in Heizkesseln bzw. in den bekannten Wärmekraftmaschinen entsteht als Abprodukt wiederum Wasser. Somit erfährt die Umwelt durch die Nutzung des Wasserstoffes keinerlei Kohlendioxidbelastung, lediglich der Stickoxidfreisetzung beim Verbrennungsprozeß ist mit den technisch zur Verfügung stehenden Mitteln zu begegnen. Der Wasserstoff besitzt als Energieträger den Nachteil einer geringen Dichte, etwa $0,09 \text{ kg/m}^3$ für den gasförmigen und 71 kg/m^3 für den flüssigen Zustand bei Normalluftdruck. Daraus resultiert, trotz des hohen

¹ Quelle: Umweltbundesamt, Daten zur Umwelt 1997

Heizwertes von 120 MJ/kg, eine geringe volumetrische Energiedichte. Sie beträgt 10 MJ/m³ für gasförmigen und 8.500 MJ/m³ für flüssigen Wasserstoff gegenüber etwa 38.000 MJ/m³ für Dieselkraftstoff. Mit erforderlicher Verflüssigung des Energieträgers erhöht sich folglich dessen Preis. Derzeit werden weltweit erhebliche finanzielle Mittel eingesetzt, um die Möglichkeiten der wirtschaftlichen Anwendbarkeit des Wasserstoffes als künftigen Energieträger zu erkunden. In einigen Bereichen wird der Wasserstoff bereits energetisch genutzt, so beispielsweise in der Raketentechnik und bei Spitzenlastdampfzeugern. Zum anderen werden unterschiedliche Anwendungsuntersuchungen durchgeführt, wie in PKW-Motoren, in der Flugzeugtechnik, in Brennstoffzellen sowie auf kleineren und mittleren Dieselmotorprüfständen. Hier erfolgt teilweise bei äußerer Gemischbildung eine Wasserstoffzumischung zu anderem Brenngas. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann naturgemäß noch nicht quantitativ eingeschätzt werden, welchen Anteil der Wasserstoff als Energieträger in der künftigen, notwendigerweise in Richtung Umweltfreundlichkeit geänderten Energiewirtschaft einnehmen wird. Das wird sich erst im Zuge der weiteren Entwicklung im Widerstreit zwischen den ökologischen Zielstellungen und den ökonomischen Rahmenbedingungen herausbilden. Jedoch kann man davon ausgehen, daß der Wasserstoff mit Sicherheit einen bedeutsamen Platz unter den umweltfreundlichen Energieträgern einnehmen wird.

2 Zielstellung

Die MET Motoren- und Energietechnik GmbH als unabhängiges Innovationsunternehmen hat aufgrund der zwingend gebotenen Zukunftsorientierung und des vorstehend dargelegten Entwicklungsstandes Forschungsthemen zur Wasserstoffproblematik bearbeitet.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen dabei energiewirtschaftliche und sicherheitstechnische Aspekte beim Betrieb von Dieselmotoren im Leistungsbereich zwischen 5 und 50 MW mit Wasserstoff als Brennstoff.

Motoren dieser Leistungsklasse werden sowohl für Schiffsantriebe als auch in Landanlagen, in sogenannten Blockheizkraftwerken (BHKW), als Erzeuger von elektrischer Energie und Heizwärme eingesetzt. Sie besitzen von allen Wärmekraftanlagen den höchsten effektiven Wirkungsgrad, was hinsichtlich der hohen Kosten für die Erzeugung von Wasserstoff und der erzielbaren Leistungskonzentration innerhalb eines Aggregates von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist.

3 Lösungsweg

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Der Gesamtwirkungsgrad und damit die Leistungskonzentration eines Motors werden im wesentlichen durch den thermischen Wirkungsgrad des realen Kreisprozesses bestimmt. Dieser wiederum ist bei einem vorgegebenem Motor vom zeitlichen Verlauf der Wärmezufuhr abhängig. Gelingt es, die Wärmezufuhr zum Kreisprozeß bei Wasserstoffeinsatz in gleicher Weise zu realisieren wie bei der Verbrennung von herkömmlichem Dieselkraftstoffen, kann mit der Beibehaltung des Kreisprozesses auch von gleichen mechanischen und thermischen Belastungen des Motors ausgegangen werden. Der Einfluß der thermischen Eigenschaften der Verbrennungsprodukte auf den Kreisprozeß ist vernachlässigbar, weil der hohe Stickstoffanteil gegenüber dem Betrieb mit Dieselkraftstoff nicht verändert wird.

Der Kenntnisstand zur Anwendung von Wasserstoff in Verbrennungskraftmaschinen, der aus der Literatur [1] - [12] gewonnen werden konnte, führt für einen Dieselmotor der angesprochenen Größenordnung zu folgenden konstruktiven und Auslegungsrichtlinien:

- Der Prozeß der motorischen Energiewandlung ist nur mit einer inneren Gemischbildung erfolgversprechend zu gestalten, d.h. mit einer Hochdruckeinblasung des Brennstoffes in den Kompressionsraum zum gewünschten Zündzeitpunkt. Dadurch werden die Probleme der äußeren Gemischbildung umgangen, die darin bestehen, daß die Zylinderleistung abnimmt, Frühzündungen, Flammrückschläge und unkontrollierter Brennverlauf auftreten und zündfähiges Wasserstoff-Luft-Gemisch außerhalb des Brennraumes existiert, was aus Sicherheitsgründen nicht zugelassen werden kann.
- Das Sicherheitskonzept sollte so angelegt sein, daß bei regulärem Motorbetrieb an keinem ungewollten Ort im Motor und zu keinem Zeitpunkt aufbereitetes, zündfähiges Gemisch existiert. Denn bei den schon erwähnten großen Abmessungen und der hohen Zündwilligkeit des Wasserstoff-Luft-Gemisches wäre im Falle einer Explosion das Schadensrisiko unverantwortlich groß.
- Das Zünden des in den Kompressionsraum eintretenden Wasserstoffes erfolgt mit einer permanent elektrisch beheizten Glühvorrichtung möglichst dicht an der Einblasstelle, so daß der Einblasbeginn praktisch den Zündzeitpunkt darstellt.
- Es darf angenommen werden, daß aufgrund der extrem guten Zündbedingungen (4 - 75 Vol.% Zündbereich, minimale Zündenergie) und der hohen Brenngeschwindigkeit die Einblasdauer und der Einblasverlauf die gleichen Werte annehmen wie die Brenndauer

und der Brennverlauf.

- Die geringe Dichte des Wasserstoffes erfordert eine hohe Einblasgeschwindigkeit. Hierfür erweist es sich als vorteilhaft, die Schallgeschwindigkeit zu wählen. Diese bleibt trotz Änderung des Gasdruckes im Brennraum während der Verbrennung konstant, wenn man den Druck vor dem Einblasorgan so legt, daß zu keiner Zeit das Schalldruck-Verhältnis von 0,53 überschritten wird. Damit bleibt die Einblasmenge zeitlich konstant und ihre Dosierung reduziert sich auf die Steuerung der Einblasdauer. Aus diesen Gründen muß der Druck des Wasserstoffes bei ca. 300 bar liegen. Die Einblasorgane sind zwecks Minimierung ihrer mechanischen und thermischen Belastung möglichst klein zu dimensionieren, was ebenfalls eine hohe Einblasgeschwindigkeit bedingt.
- Zur Minimierung der NO_x -Entstehung, welche der Höhe und Haltezeit der örtlichen Prozeßtemperatur proportional ist, sind gute Vermischungsverhältnisse im Brennraum anzustreben.
- Somit konzentriert sich die Beantwortung der in der Zielstellung aufgeworfenen Frage im wesentlichen auf die quantitative Realisierbarkeit der Probleme der Gemischbildung, Zündung und Verbrennung des Wasserstoffes im Dieselmotor.

3.2 Nachprüfung einiger Ansätze

In den Auslegungsrichtlinien wurden einige Punkte aus physikalischen Grundkennwerten des Wasserstoffes theoretisch abgeleitet, die der praktischen Bestätigung bedürfen.

- Durch überkritisches Einblasen von Wasserstoff in einen Modellbrennraum mit Glühkerzenzündung wurde die Zündbarkeit der Wasserstoffstrahlen und anhand der zeitlichen Druckentwicklung im Brennraum (s. Abb. 1, mittlere Kurven) die Gleichsetzbarkeit von Einblas- und Brenndauer bestätigt. Die im Diagramm sichtbaren Abweichungen von der Gleichheit bezüglich Einblas- und Brenndauer resultieren bei den unteren Kurven aus Luftmangel, bei den oberen Kurven aus dem Abfall des Einblasdruckgefälles [17]; [18].
- Die Analyse des Kreisprozesses des Beispielmotors mit Hilfe des CIMAC-Programmes [13] hinsichtlich der Wärmezufuhr ergab, daß die Wärmezufuhr ohne Wirkungsgradeinbuße als zeitlich konstant mit Anfahr- und Auslaufphase gemäß Abb. 2 vorgenommen werden kann. Die Optimierung hat nur zwischen den Größen "Wärmemenge pro Zeiteinheit" und "Einblasdauer" zu erfolgen.

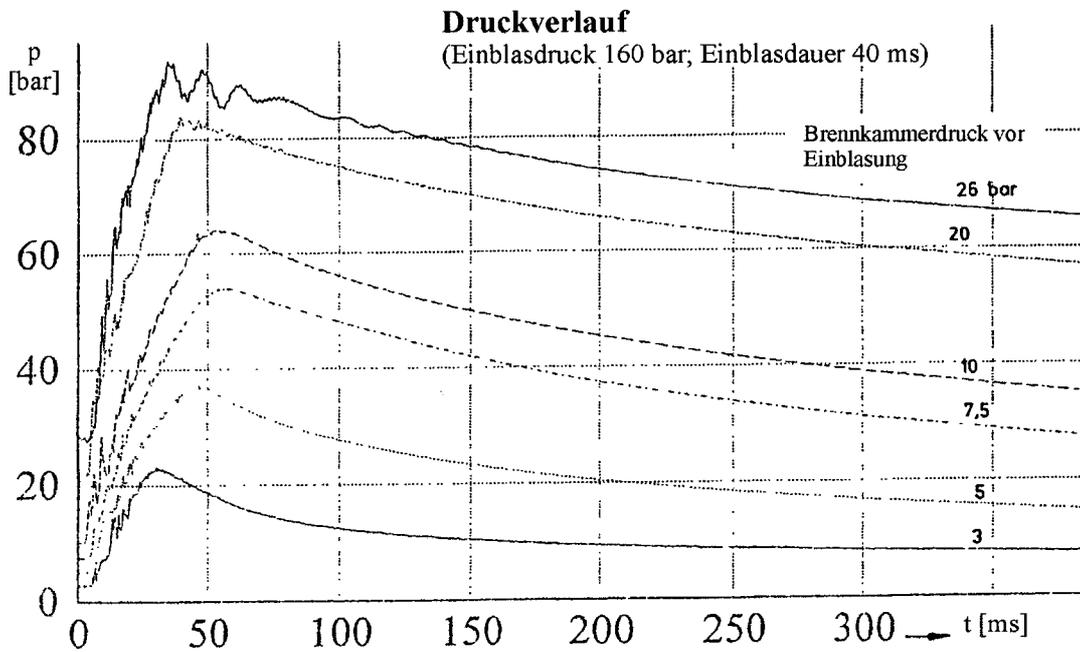


Abb. 1 Druckverlauf im Brennraum (Experiment)

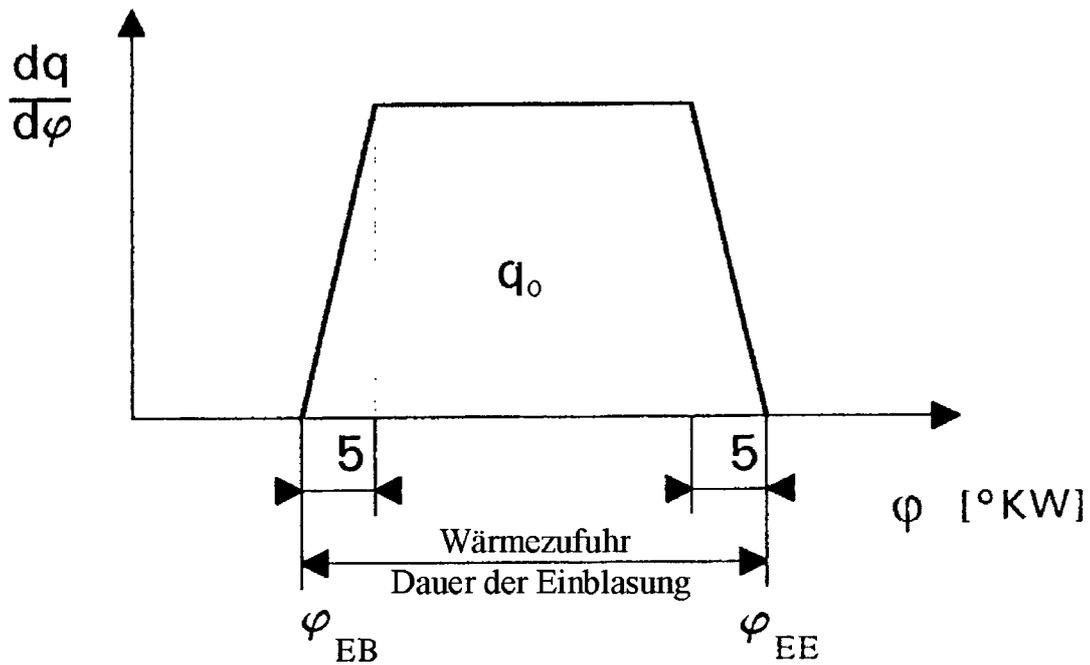


Abb. 2 Verlauf der Wärmezufuhr

3.3 Entwurfsarbeiten

Basierend auf den relevanten Motordaten und den Wasserstoffeigenschaften erfolgten Auslegung und Entwurf des Einblasorgans sowie der Brennstoffversorgung für eine Anlage mit

einer Leistung von 42 MW [12]. Die Anlage besteht aus 6 Motoren vom Typ ZA40S in 12-Zylinderausführung bei einer Leistungsstufe von 600 kW je Zylinder. Das Einblasventil erwies sich als technisch realisierbar ohne Änderung der angrenzenden Hauptbauteile.

Die strömungstechnische Auslegung der Wasserstoff-Versorgungsanlage für den Motor entsprechend Bild 3 erfolgte mittels einer eindimensionalen Simulationsrechnung. Auf der Grundlage dieser Simulationsanalysen konnte eine gleichmäßige Brennstoffzufuhr zu allen Zylindern erreicht werden [14]; [15]; ###16].

Aufgrund der oben angesprochenen Brenneigenschaften des Wasserstoffes benötigt der Motor ein aufwendiges Sicherheitssystem. Unter dem Aspekt des möglichen Schiffseinsatzes wurde ein solches konzipiert. Das Schema ist in Abb. 3 dargestellt.

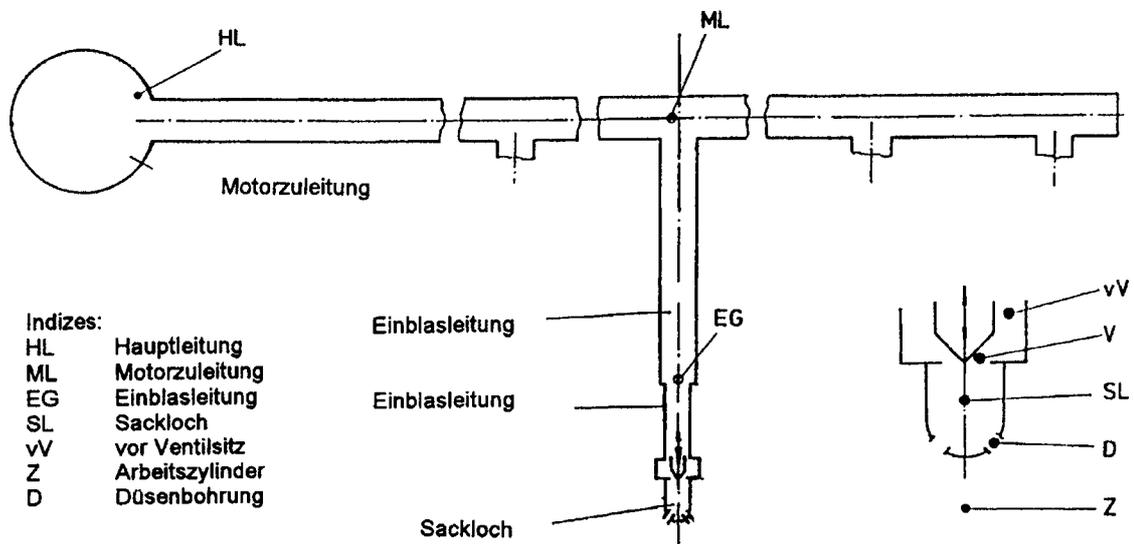


Abb. 3 Schema der Brennstoffversorgung

Die hauptsächlichen Charakteristika für die Brennstoffversorgung sind:

- aufbereitetes zündfähiges Wasserstoff-Luft-Gemisch befindet sich durch Anwendung der Hochdruckeinblasung nicht im Motor
- doppelwandige Rohrleitungen mit Luftdurchsaugung und Sensorüberwachung
- Rohrleitungen in Sicherheitsbereiche unterteilt, durch Schnellschlußventile getrennt
- Verwendung resistenter Stähle, vorzugsweise Schweißverbindungen
- Sensorüberwachung für im Störfall wasserstoffgefährdete Lufträume inner- und außerhalb des Motors, für Nadellhub des Einblasventiles, für die Zündhilfe sowie für alle anderen sicherheitsrelevanten Steuerorgane.

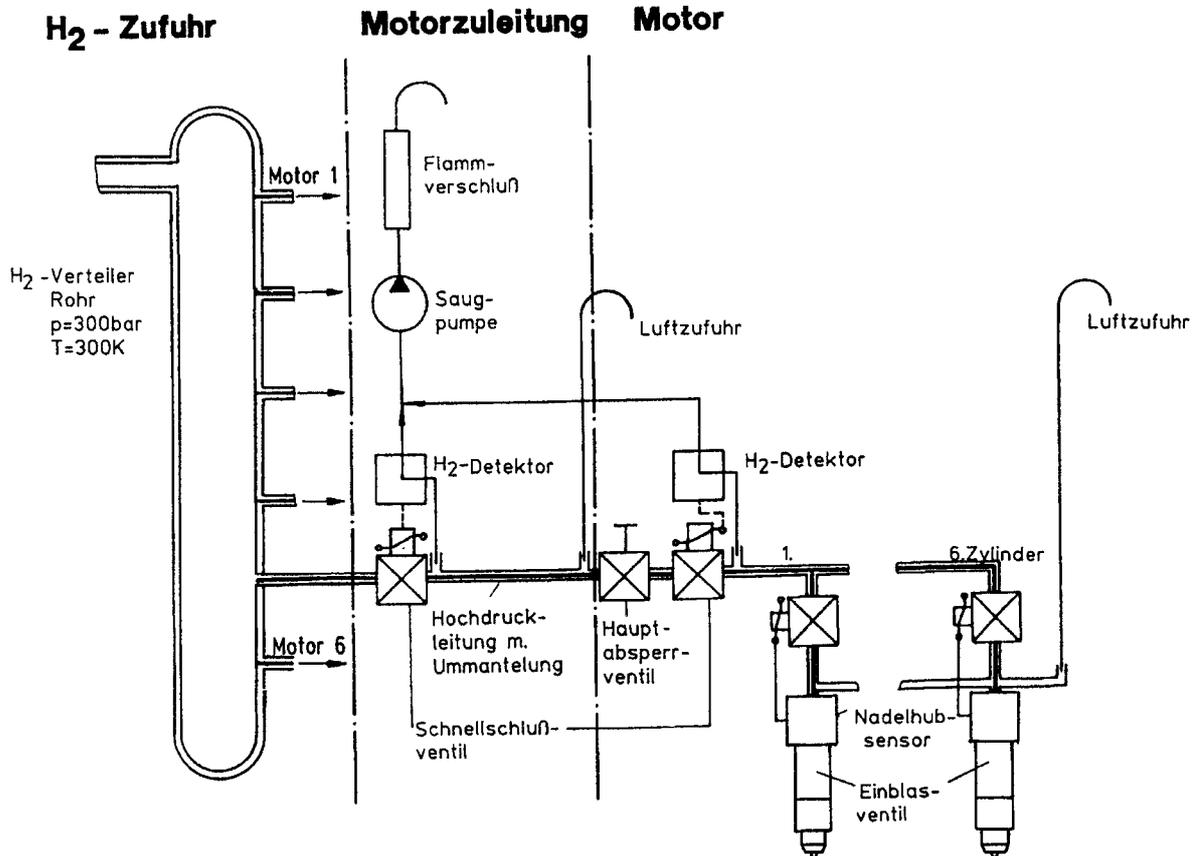


Abb. 4 Schema des Versorgungs- und Sicherheitssystems

3.4 Untersuchung der Strömungs-, Gemischbildungs- und Verbrennungsvorgänge mit Hilfe virtueller Modelle

Aus den bisherigen Untersuchungen konnten noch keine Aussagen getroffen werden, wie sich die Wasserstoffstrahlen beim Eindringen in die komprimierte Luft im Brennraum verhalten. Von diesem Verhalten, d.h. von ihrer Ausbreitung, von der zeitlichen Entwicklung des Konzentrationsfeldes hängt es ab, wie Zündung und Verbrennung ablaufen und wie sie gegebenenfalls zu beeinflussen sind.

Als geeignete Methode zur Simulation dieser komplizierten Vorgänge bestätigt sich zunehmend die CFD-Simulation (Computational-Fluid-Dynamics). Umfangreiche eigene Erfahrungen liegen u.a. mit dem Programmsystem CFX-TASCflow vor, das folgende Vorgehensweise beinhaltet:

Grundgleichungen

Das in CFX-TASCflow verwendete mathematische Modell besteht aus den ensembledemittel-

ten Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Totalenthalpie. Zur Bestimmung der mittleren Wasserstoffkonzentration wird eine zusätzliche Transportgleichung für diese Größe gelöst. In einem kartesischen Koordinatensystem lautet die Modellgleichung in Tensorschreibweise:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial(\tau_{ij} + \rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j H)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial(q_j + \rho \overline{u_j H'})}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j C)}{\partial x_j} = \frac{\partial(j_j - \rho \overline{u_j c})}{\partial x_j}$$

Darin steht U_i für die mittleren Geschwindigkeiten in den x_i -Koordinatenrichtungen, P für den mittleren statischen Druck und C für den Massenanteil von Wasserstoff. Die Zeit hat das Symbol t . Die Kleinbuchstaben stellen die entsprechenden fluktuierenden Felder dar. Die Dichte des Fluids ist mit ρ bezeichnet.

Die Totalenthalpie ist definiert als:

$$H = h + \frac{U_i U_i}{2} + k$$

wobei h die mittlere statische Enthalpie des Fluids und k die turbulente kinetische Energie bezeichnet. In den Berechnungen wird angenommen, daß es sich bei den verwendeten Fluiden um ideale Gase handelt.

$$dh = c_p dT$$

Die molekularen Flüsse τ_{ij} , q_j und j_j werden unter Verwendung der Gesetze von Stokes, Fourier und Fick wie folgt mit den mittleren Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsgradienten in Beziehung gesetzt:

$$\tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i}$$

$$q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho \sum_i^n h_i C_i$$

$$j_j = \Gamma_i \frac{\partial C}{\partial x_j}$$

bezeichnet die dynamische Viskosität; Γ_i ist der molekulare Diffusionskoeffizient; T ist die absolute Temperatur und λ die Wärmeleitfähigkeit.

Die partiellen Dichten ρ_i werden aus dem mittleren Druck P und der mittleren Temperatur mit Hilfe des idealen Gasgesetzes bestimmt:

$$\rho_i = \frac{P}{R_i T}$$

wobei R_i die spezifische Gaskonstante der jeweiligen Komponente ist.

Setzt sich das strömende Medium aus mehreren Komponenten zusammen, so wird die mittlere Dichte aus den Massenanteilen der einzelnen Komponenten gemäß

$$\frac{1}{\rho} = \sum_i^n \frac{C_i}{\rho_i}$$

berechnet. Hierbei bezeichnet ρ_i die Dichte der jeweiligen Komponente. Die anderen Stoffgrößen werden ebenfalls aus den Massenanteilen der einzelnen Komponenten gemäß

$$\phi = \sum_i^n C_i \varphi_i$$

ermittelt. In der obigen Gleichung bezeichnet ϕ einen gemittelten Stoffwert der Komponenten.

Die Gleichungen enthalten die Reynoldsspannungen $\overline{\rho u_i u_j}$, die turbulenten Energieflüsse $\overline{\rho u_j H}$ und die turbulenten Konzentrationsflüsse $\overline{\rho u_j c}$. Diese müssen mit Hilfe eines Turbulenzmodells mit den mittleren Größen in Verbindung gebracht werden, bevor eine geschlossene Lösung des Gleichungssystems möglich ist.

Turbulenzmodell

In CFX-TASCflow wird das k - ϵ -Turbulenzmodell (Launder und Spalding 1974) verwendet, um den turbulenten Transport von Impuls und Konzentration mit den mittleren Größen in Verbindung zu setzen. Dabei werden die Reynoldsspannungen mit Hilfe der Wirbelviskositätshypothese in folgender Weise als Funktion der mittleren Deformationsraten (Geschwindigkeitsgradienten) ausgedrückt:

$$\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k$$

Das Symbol k steht für die turbulente kinetische Energie der Schwankungsbewegung und ist definiert als:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$$

Die Wirbelviskosität ist keine Stoffgröße, sondern von der lokalen Turbulenzstruktur im Strömungsfeld abhängig. Aus Dimensionsgründen ist diese zu einem Geschwindigkeits- ($\alpha \sqrt{k}$) und Längenmaß ($\alpha k^{3/2} / \epsilon$) proportional und ergibt sich zu:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

ist die Dissipationsrate von k , d.h. der Betrag von k , der pro Zeit- und Masseneinheit durch viskose Kräfte in innere Energie des Fluids überführt wird.

Der Wert der empirischen Konstante c_μ kann aus Messungen wandnaher Strömungen ermittelt werden und ist in der Tabelle angegeben.

| c_μ | $c_{\sigma 1}$ | $c_{\sigma 2}$ | σ_k | σ_ε | $S c_t$ | Pr_t |
|---------|----------------|----------------|------------|----------------------|---------|--------|
| 0.09 | 1,44 | 1,92 | 1,0 | 1,3 | 0,9 | 0,9 |

Lokale Werte von k und ### werden aus der Lösung den folgenden semiempirischen Transportgleichungen ermittelt:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\sigma 1} P_k - \rho c_{\sigma 2} \varepsilon)$$

Die Produktionsrate P_k der turbulenten kinetische Energie ist dabei definiert als:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

Die Korrelationen $\overline{\rho u_j H'}$ und $\overline{\rho u_j c}$ werden mit Hilfe der Wirbeldiffusitätshypothese bestimmt:

$$-\overline{\rho u_j H'} \approx \overline{\rho u_j h'} = \frac{\mu_t}{Pr_t} c_p \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$-\overline{\rho u_j c} = \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C}{\partial x_j}$$

Die Größe h' steht für die turbulente Schwankung der statischen Enthalpie. Pr_t und Sc_t sind die turbulente Prandtl- und Schmidtzahl. Ihr Wert wird auf 0,9 gesetzt. Für die restlichen empirischen Konstanten in den Modellgleichungen werden die von Launder und Spalding (1974) angegebenen und in der Tabelle zusammengestellten Konstanten verwendet.

Verbrennungsmodellierung

Für die Modellierung der Verbrennung wurde in der dargestellten Untersuchung das Eddy Dissipation Model (Wirbel-Verteilungs-Modell) genutzt [26]. Das Eddy Dissipation Model basiert auf dem Prinzip, daß die chemischen Reaktionen sehr viel schneller verlaufen als die turbulenten Transportprozesse in der Strömung. Deshalb wird in dem Modell angenommen, daß die Reaktionsrate direkt von der Zeit abhängt, welche benötigt wird, um die Reaktionspartner auf molekularem Niveau miteinander zu vermischen. In turbulenten Strömungen ist die Reaktionsrate proportional zur Mischungszeit, welche durch die turbulente kinetische Energie k und die Dissipation ε definiert wird. Das genutzte Modell basiert auf einer Einschrittreaktion in der Kraftstoff und Oxidator, unter der Freisetzung von Wärme, zum Produkt reagieren.

Numerisches Lösungsverfahren

Der numerische Lösungsalgorithmus in CFX-TASCflow basiert auf einer konservativen Finiten-Volumen-Methode [21]. In dieser Näherung wird nicht die Transportgleichung selbst approximiert, sondern eine formal durch Integration über ein Kontrollvolumen der Transportgleichung abgeleitete Flußbilanz. Die Methode verwendet nicht-orthogonale Rechengitter und kartesische Geschwindigkeitskomponenten. Alle abhängigen Variablen werden im Zentrum des jeweiligen Kontrollvolumens abgespeichert (nicht versetzte Variablenanordnung [22]). Die diffusiven Flüsse werden mit zentralen Differenzen diskretisiert, während die konvektiven Flüsse mit einem richtungsabhängigem "Skew Upwind" Diskretisierungsverfahren [23] in Verbindung mit einem physikalischen Korrekturterm approximiert werden. Die Zeitdis-

kretisierung erfolgt durch eine rückwärts gerichtete Euler Approximation. Das resultierende Gleichungssystem wird mit einer algebraischen Mehrgitter-Methode gelöst [24]. Die Impuls- und Kontinuitätsgleichungen werden gekoppelt, die Turbulenz- und Energiegleichungen sukzessive gelöst. Weitere Informationen des Verfahrens sind in [25] gegeben.

Die Fragen, die für die Wasserstoffeinströmung in den Brennraum von Interesse sind, lassen sich wie folgt formulieren:

- Welche Anzahl von Einblasbohrungen sollte gewählt werden, um eine gleichmäßige Brennstoffverteilung im Kompressionsraum zu erzielen ?
- Wie ist die Richtung der Einblasbohrungen zu wählen ?
- Welchen Einfluß hat die geometrische Ausbildung der vor den Eintrittsbohrungen liegenden Zuströmkanäle auf die Strahleintrittsbedingungen (Richtung, Geschwindigkeit) ?
- Wie viele Zündquellen sind erforderlich, um den Brennstoff in einer gewünschten Frist vollständig zu zünden ?
- Welchen Einfluß hat ein Vordrall der Luft im Kompressionsraum auf die Gemischaufbereitung ?
- Welche Unterschiede bestehen im Strahlausbreitungsverhalten bei unterschiedlichen Gasen?

Im Folgenden wird dargestellt, wie die angesprochenen Probleme mit Hilfe der CFD-Analyse gelöst werden können.

Einleitend wurden das im Entwurf vorliegende Einblasorgan und der Original-Kompressionsraum des Beispielmotors modelliert [19]. In Abb. 5 ist das Modell des Strömungskanales in der Einblasdüse sowie des Kompressionsraumes im vernetzten Zustand zu sehen. Es verkörpert die Ausführung mit acht Düsenbohrungen. Aus Symmetriegründen wurde aus dem Gesamtmodell des Brennraums ein 1/8-Modell herausgelöst, wobei die an einem Symmetrierand des 1/8-Modells austretende Strömung als Einströmrandbedingung für den gegenüberliegenden Symmetrierand angesetzt wird (periodische Randbedingung). Dies führt zu einer erheblichen Einsparung an Rechnerressourcen (Hauptspeicherbedarf, Rechenzeit) während der Projektbearbeitung.

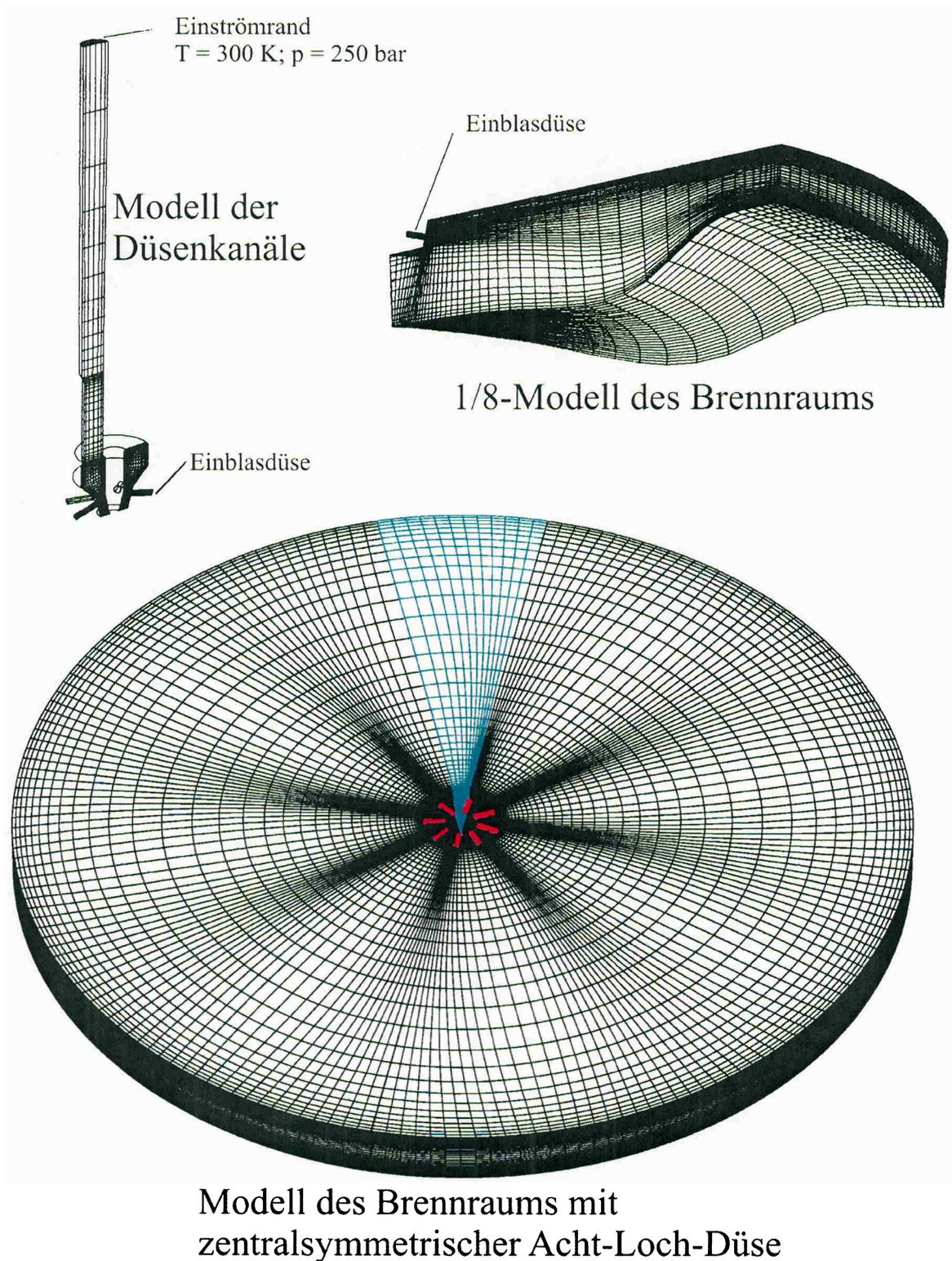


Abb. 5 Numerisches Gitter der Düsenkanäle und des Brennraums

Für die Anordnung der Einblasbohrungen nach Anzahl und Richtung sind folgende Aspekte ausschlaggebend:

Bei der Verbrennung sollen sich die heißen Reaktionsprodukte möglichst rasch mit dem Rest

des Zylinderinhaltes vermischen, damit die Phase der höchsten Temperatur möglichst kurz ist. Dadurch wird die NO_x -Bildung klein gehalten. Die Brennstoffstrahlen sollen den gesamten Brennraum gleichmäßig erfassen. Darauf sind Bohrungsanzahl und Strahllänge abzustimmen. Außerdem dürfen die Brennstoffstrahlen nicht auf die Brennraumwandungen durchschlagen, um örtliche Überhitzungen zu vermeiden. Die Ausbildung der noch ungezündeten Strahlen als Vorstufe für die Verbrennung ist an diesen Forderungen zu orientieren.

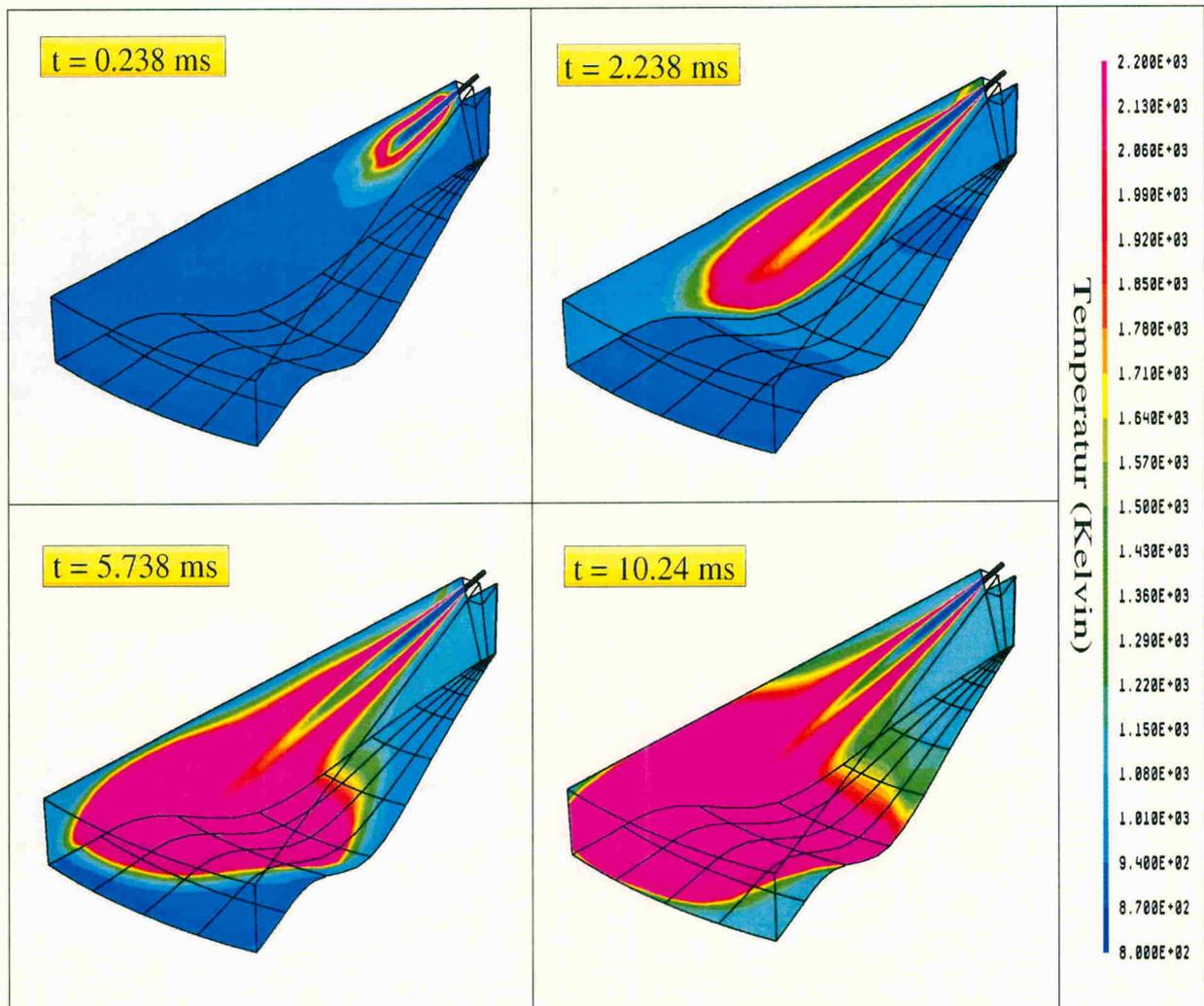


Abb. 6 Temperaturverteilung in einem Brennraumsegment (4-Takt Tauchkolbenmotor)

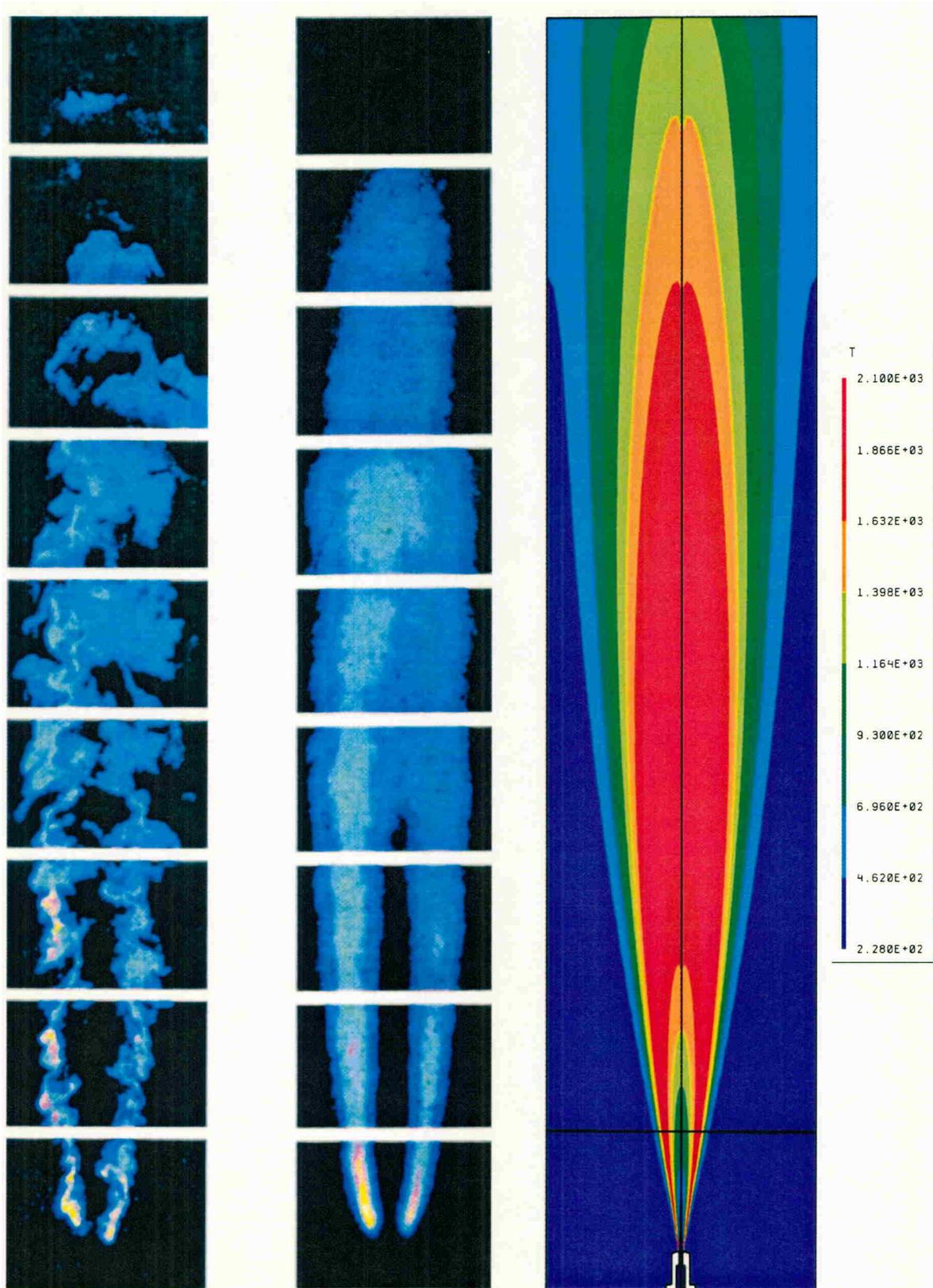
Abb. 6 zeigt die Strahlentwicklung in Abhängigkeit von der Zeit für eine zentralsymmetrische Acht-Loch-Düse. Systematische Untersuchungen mit 2-, 4- und 8-Loch-Düsen haben gezeigt, daß die Variante mit 8 Bohrungen den angesprochenen Aspekten am besten gerecht wird. Einerseits ist bei den Düsen mit 2 und 4 Bohrungen eine örtliche Überhitzung der radialen Brennraumwand zu befürchten, zum anderen füllen die Strahlen der 8-Loch-Düse den Brennraum gleichmäßiger aus. Das deutet auf eine gute Vermischung des Zylinderinhaltes hin, was zur Absenkung der Spitzentemperaturen erwünscht ist.

Will man die notwendige Anzahl und die Anordnung der Zündquellen ermitteln, so kann aus der zeitlichen Entwicklung der Konzentrationsfelder der Zeitpunkt ermittelt werden, an dem sich die Linien der unteren zündfähigen Brennstoffkonzentration zweier Nachbarstrahlen erstmalig berühren. Dieser Zeitpunkt kennzeichnet etwa das Überspringen der Flamme eines gezündeten Stahles auf einen ungezündeten Nachbarstrahl. Die durchgeführten Simulationsrechnungen zeigen, daß dieses für 2; 4 und 8 Düsenbohrungen nach 5,73ms; 4,32ms bzw. 2,42ms erfolgt. Mit Berücksichtigung der Wärmefreisetzung durch Zuschalten des Verbrennungsmoduls im Programmpaket CFX-TASCflow ist eine Erhöhung der Genauigkeit dieser Aussagen möglich. Der Einfluß des Vordralles der Kompressionsluft auf die Strahlentwicklung läßt sich ebenfalls mit in die CFD-Analyse integrieren. Im untersuchten Falle wurde eine Drallgeschwindigkeit am Brennumaßenrand von $v=10\text{m/s}$ angesetzt. Ihr Einfluß ist sichtbar, aber infolge der hohen Strahlgeschwindigkeit bewirkt der Drall keinen Qualitätsumschlag im Strömungsbild.

Spezielle Untersuchungen zur komplexen Simulation und experimentellen Überprüfung der Strömungs- und Verbrennungsvorgänge bei einem mit Schallgeschwindigkeit frei austretenden Wasserstoffstrahl wurden im Rahmen eines BMBF-Förderprojektes durchgeführt.

Abb. 7c zeigt die Wasserstoffflamme in der CFD-Simulation. Der gemittelte Prozeßablauf wird trotz der vereinfachenden Annahmen relativ gut vorausbestimmt. Im Experiment (LIF-Untersuchungen) zeigte sich, daß der einzelne Prozeßablauf durch eine große Turbulenz während des Ausström- und Verbrennungsvorganges gekennzeichnet ist (Abb. 7b). Dadurch wird die Messung der orts- und zeitabhängigen Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Dichtezustände erheblich erschwert.

Beim Vergleich der experimentell gewonnenen und zeitlich gemittelten Ergebnisse für eine Freiflamme mit der CFD- Simulation zeigt sich eine gute Übereinstimmung im mittleren Flammenbereich. In den Bereichen unmittelbar nach Austritt aus der Düse und am Ende der Flamme sind tiefergehende Untersuchungen (u.a. gezielte Partikelgeschwindigkeits- und Gas-konzentrationsuntersuchungen) notwendig.



a) Einzelbild
Konz. der OH-Ionen

b) 100 Bilder gemittelt
Konz. der OH-Ionen

c) CFD-Simulation
Temperaturverteilung

Abb. 7

Messung und CFD-Simulation einer Wasserstoffflamme

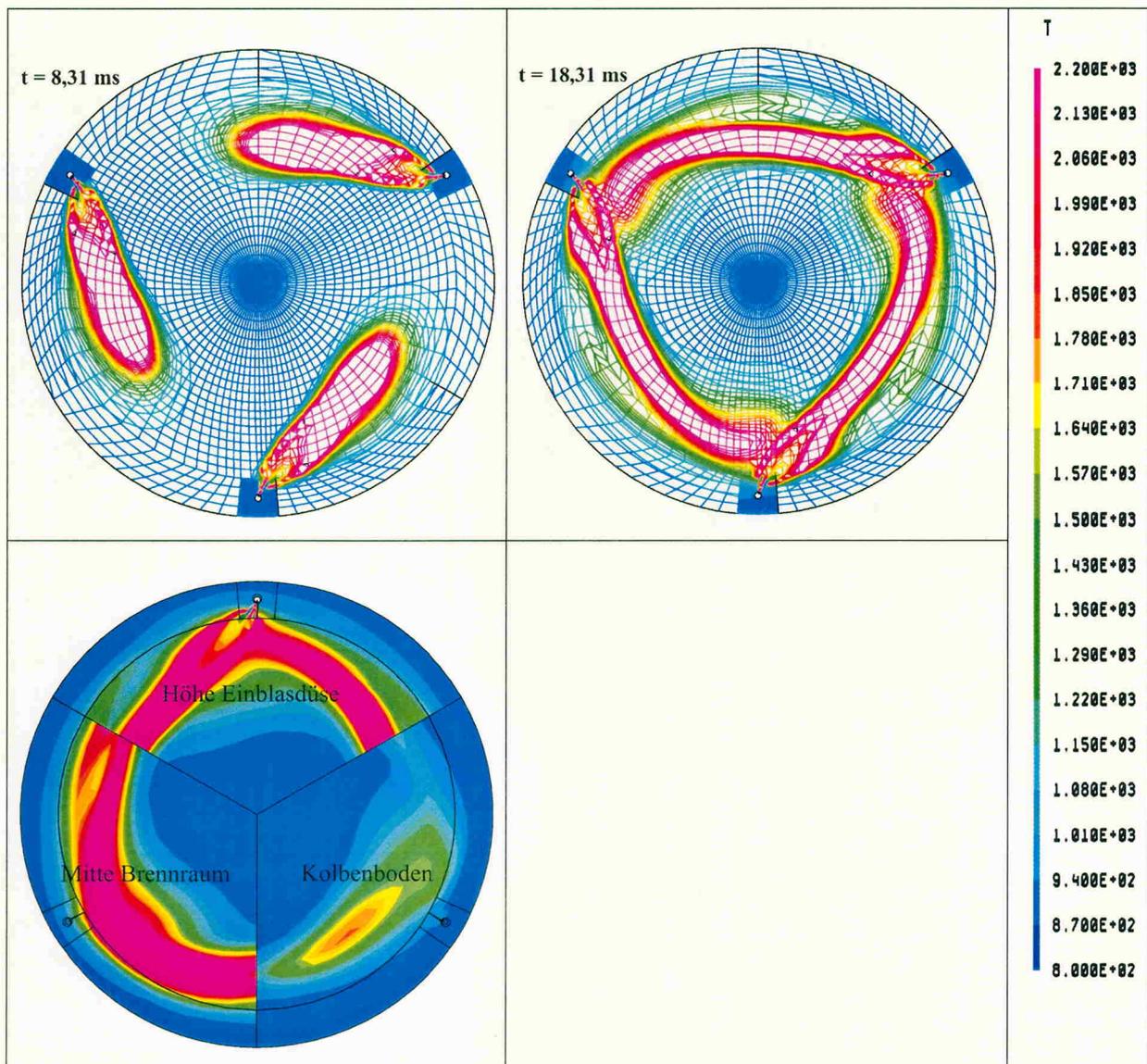


Abb. 8 Temperaturverteilung im Brennraum eines 2-Takt Kreuzkopfmotors mit dezentraler Einblasdüse (3 Stück mit je 5 Löchern)

Abschließend zeigt Abb. 8 beispielhaft Ergebnisse für die Ausdehnung der Untersuchungen auf 2-Takt Kreuzkopfmotoren. Zur Realisierung der Einblasung wurden im abgebildeten Fall dezentral 3 Einblasdüsen mit je 5 Löchern angeordnet und eine Wasserstoffverbrennung simuliert. Die Darstellung der Temperaturverteilung im Brennraum zu verschiedenen Zeiten bzw. in unterschiedlichen Ebenen senkrecht zur Zylinderachse zeigt deutlich die starke Wechselwirkung zwischen Einblasung und Drall.

4 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und der erzielten Ergebnisse konnte ge-

zeigt werden, daß der wirtschaftliche Einsatz von Wasserstoff trotz seiner extremen physikalischen Eigenschaften als Brennstoff in großen Dieselmotoren realisierbar ist. Bei den durchgeführten Untersuchungen sind keine grundsätzlichen Probleme aufgetreten, die einem solchen entgegenstehen. Für den Einsatz von Wasserstoff erweisen sich Großdieselmotoren als besonders geeignet, da sie den höchsten Wirkungsgrad unter den Verbrennungskraftmaschinen haben. Somit kann der sparsamste Umgang mit dem kostspieligen Energieträger gewährleistet werden. Außerdem werden so die umwelttechnischen Vorteile des Wasserstoffes für Großverbraucher nutzbar gemacht, d.h. die Vermeidung großer Schadstoffausstöße in Form von Kohlendioxid sowie die Minimierung der Verluste in der Verteilerkette.

Der Einsatz von Wasserstoff in Großdieselmotoren ist sowohl in Landanlagen in Form von Blockheizkraftwerken als auch im Schiffsbetrieb möglich. Da auf Grund der geringen Dichte auch des flüssigen Wasserstoffes die Brennstofftanks ohne Isolierung ca. fünfmal größer sein müssen als bei herkömmlichen Dieselmotoren, erscheint sein Einsatz auf See nur bei Tankern für flüssigen Wasserstoff erfolversprechend zu sein.

Als weiteres Ergebnis der durchgeführten Arbeiten ist zu werten, daß die im Rahmen des Themas angewandten Bearbeitungsmethoden selbstverständlich auch für die Beurteilung der Einsatzchancen, der zu erwartenden Wirtschaftlichkeit und möglicher Leistungsausbeuten für andere alternative, speziell gasförmige Brennstoffe eingesetzt werden können. Als Beispiele seien Schwach-, Schwel- oder Biogas genannt. Das betrifft speziell die Methoden der Prozeßanalyse und der Computational-Fluid-Dynamics-Simulation. Die Bedeutung der CFD-Simulation für die Entwurfs- und Entwicklungsphase bei Verbrennungsmotoren ist besonders zu unterstreichen. Einerseits sind bis auf die eindimensional behandelbaren reinen Rohrleitungsströmungen alle "klassischen" Strömungsprobleme an Motoren aufgrund der Kanalformgebung nur dreidimensional realistisch zu erfassen. Als Beispiele seien die Kühlmittelführungen (Block, Buchse, Zylinderkopf, Kolben) sowie die Luftversorgung und das Abgassystem zu nennen. Dabei wird gleichzeitig die Frage der Wärmeübergangszahlen physikalisch erfaßt. Zum zweiten bietet die mögliche CFD-Simulation der Vorgänge im Brennraum von gasbetriebenen Motoren, inklusive Wärmefreisetzung, einen enormen Vorteil bei der Optimierung des Brennraumes, der Einblas- und der Zündvorrichtungen.

Hervorzuheben ist bei Anwendung der CFD-Simulation die mögliche Vielzahl kurzfristiger Variantenuntersuchungen am CFD-Modell gegenüber Untersuchungen an Erprobungsbau teilen auf einem Versuchsmotor. Die Kostenfrage unterstreicht ebenfalls die Vorteile der CFD-Simulation bei Einsparung motorischer Erprobungsläufe. Die in den vorstehend ge-

schilderten Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse bedürfen einer Vertiefung und Erweiterung sowie praktischer Absicherung, um am Ende der Entwicklung zu einem funktionstüchtigen und wirtschaftlich arbeitenden Produkt zu gelangen.

Die experimentelle Bestätigung der Funktionstüchtigkeit der entworfenen Einblasorgane inklusive ihrer Steuerung im Dauereinsatz an einem Funktionsmodell ist erfolgt, wobei die Dichtheit der Baugruppen sowie die präzise Dosierung der Brennstoffmenge zum angesteuerten Zeitpunkt besonders intensiv überprüft wurden. Parallel dazu wurden die Kenntnisse über die Vorgänge im Brennraum, d.h. Gemischbildung, Zündung und Verbrennung unter Einbeziehung der Wärmefreisetzung durch Anwendung einer Computational-Fluid-Dynamics(CFD)-Analyse vertieft. Im Vordergrund standen dabei die Überprüfung und Optimierung der Brennraumform sowie die Anordnung der Düsen, der Düsenbohrungen, der Zündhilfe u.a. unter dem Aspekt der thermischen Belastung der Bauteile.

In weiterführenden Untersuchungen sind die bisher gewonnenen Erkenntnisse an einem Vollmotor umzusetzen und experimentell zu bestätigen. Des weiteren sind Untersuchungen anzustellen, ob sich aus den extremen Brenneigenschaften des Wasserstoffes in Verbindung mit präziser Dosierung, d.h. mit steuerbarer Wärmezufuhr, Möglichkeiten zur Verbesserung herkömmlicher Kreisprozesse finden lassen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Das, L.M., "Fuel Injection for a Hydrogen- Operated Engine", Intern. Journal Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 11, pp. 833-842, (1990).
- [2] Das, L.M., "Exhaust Emission Characterization of Hydrogen-Operated Engine System: Nature of Pollants and their Control Techniques", Intern.Journal Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 11, pp. 765-779, (1991).
- [3] Glasson, N. and GREEN, R., "High Pressure Hydrogen Injection", Hydrogen Energy Progress, X, Vol.2, p. 1285-1294, (1992).
- [4] Furuham, S. and KOBAYASHI, Y., "Development of a Hot-Surface Ignition Hydrogen Injection Two-Stroke Engine", Hydrogen Energy Progr.IV, Vol.3, pp.1009-1020, (1982)
- [5] Furuham, S., "Hydrogen Engine Systems for Land-Vehicles", Intern. Journal Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 12, pp. 907-913, (1989).
- [6] Fukuma, T., FUJITA, T.,PICHAINARONG, P. and FURUHAMA, S., Hydrogen Combustion Study in Direct Injection Hot Surface Ignition Engine", SAE Technisal Paper Series, No. ISSN 0148-7191.
- [7] "Wasserstoffmotoren", Literaturstudie der Gebr. Sulzer AG, Winterthur, (1988).
- [8] "Sulzer RTA Dual-fuel Marine Engines Design and Test", Gebr. Sulzer, Winterthur, Paper,(1986).
- [9] Gutmann, M., "Entwicklung eines Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahrens für Wasserstoffmotoren mit innerer Gemischbildung", Dissertation, Universität Stuttgart, (1984).

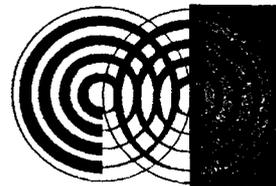
- [10] Wiedemann, H., "Motorische Verwendung von Wasserstoff, Kokereigas, Erdgas und Propan im Diesel-Gasbetrieb", Dissertation, Universität Kaiserslautern, (1989).
- [11] Aly, H., "Untersuchung des Wasserstoff-Einsatzes in Kraftwerks- und Schiffsantriebsanlagen mit Viertakt- Diesel-Gasmotoren", Dissertation, Universität Hamburg, (1993).
- [12] "Entwicklung eines Transportsystems für flüssigen Wasserstoff", Schlußbericht - MTK0462, Germanischer Lloyd - Howaldtswerke-Deutsche Werft AG - Noell LGA-Gastechnik, Hamburg, (1991).
- [13] "Programmiertes Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Prozeßdaten aufgeladener Vier- und Zweitaktmotoren bei geänderten Betriebsbedingungen", CIMAC-Bericht, TU München, (1974)
- [14] "Arbeitsprozeßauslegung und Abschätzung der Schadstoffemission für Wasserstoffverbrennung in den Motortypen ZA 40 S und RTA 58", Studie 20/2-32.000:2/93, WTZ Dieselmotoren Roßlau.
- [15] "Strömungsvorgänge bei der Hochdruck-Einblasung von Wasserstoff an den Motoren ZA40S und RTA 58", Studie 20/2-32.000:2/93, WTZ Dieselmotoren Roßlau.
- [16] ..., "Wasserstoffeinblasanlage für die Motoren ZA40S und RTA 58", Studie 20/2-32.000:1/93, WTZ Dieselmotoren Roßlau.
- [17] "Experimentelle Untersuchungen zum Gemischbildungs-, Zünd- und Verbrennungsablauf bei Direkteinblasung von Wasserstoff in Großmotoren", Abschlußbericht Forschungsthema 2133, Universität Rostock, (1993).
- [18] "Untersuchungen zur Zündung und Verbrennung von Wasserstoff in Großdieselmotoren", Abschlußbericht, IBEM Ingenieurbüro Energietechnik und Maschinenbau Rostock, (1993).
- [19] "Numerische Berechnung des Einblasvorganges in einen Kompressionsraum", Technischer Report ASCG/TR-93-09, ASC GmbH, Holzkirchen, (1993).
- ###20### Launder and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flow", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289, 1974
- ###21### C. Prakash and S.V. Pantakar, "A Control Volume Based Finite Element Method for Solving the Navier-Stokes Equations Using Equal Order Velocity-Pressure Interpolation", Numerical Heat Transfer, Vol. 8, pp. 259-280, 1985
- ###22### G.E. Schneider and M.J. Raw, "Control-Volume Based Finite Element Method for Heat Transfer and Fluid Flow Using Co-located Variables - 1. Computational Procedure" Numerical Heat Transfer, Vol. 11, pp. 363-390, 1987
- ###23### G.D. Raithby, "Skew Upstream Differencing Schemes for Problems Involving Fluid Flow", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 9, pp. 153-164, 1976
- ###24### B.R. Hutchinson and G.D. Raithby, "A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy", Numerical Heat Transfer, Vol. 9, pp. 511-537, 1986
- ###25### CFX-TASCflow User Documentation Version 2.11
- ###26### B.F. Magnussen and B.H. Hjertager, "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", Proc. 16th Symposium (international) on Combustion, 1976
- ###27### S. Bludszuweit, H. Jungmichel, "Computational-Fluid-Dynamics-Simulation for running marine engines on hydrogen, D77, 21. CIMAC-Kongreß, 1995
- [28] Baehr, H.D., "Thermodynamik", Springer Verlag, 1962
- [29] Barron, R.F., "Cryogenic Systems (Monography of Cryogenics 3), University Press New York, 1985
- [30] Schüle, M., Sckade, K., Heller, M., "HYDROMNU - PC-Programm Wasserstoffeigenschaften", Hannover, 1992

- [31] Gräfen, H., Spähn, H., "Werkstoffverhalten in Wasserstoff", VDI-Berichte Nr. 602, S. 119-138, 1987
- [32] Fischer, M., Ewald, R., "Sicherheit der Wasserstofftechnik", VDI-Berichte Nr. 602, S. 139-169, 1987

GAT GmbH

GAT GREIFSWALD

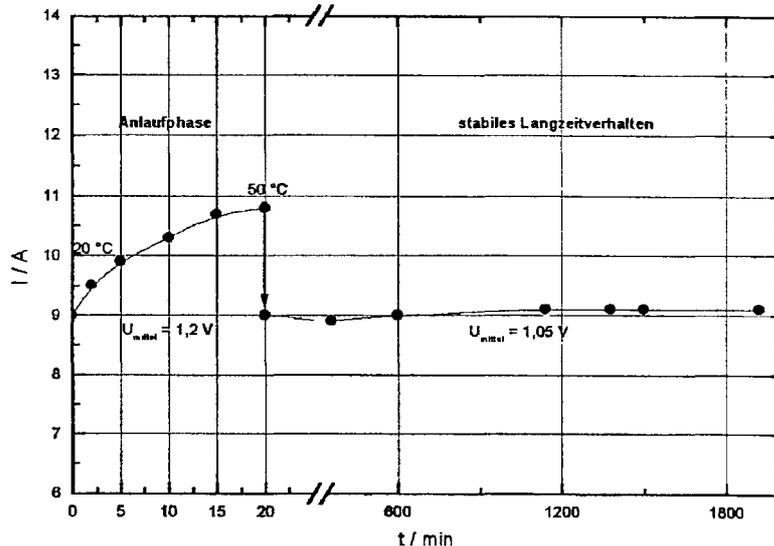
Brennstoffzellen - Elektrolysezellen - MEAs



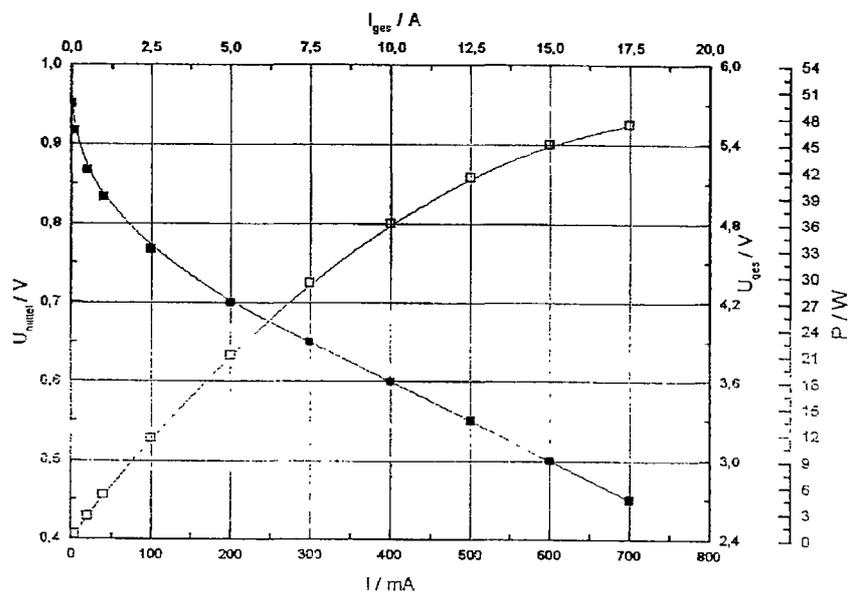
Dauertest PEMOX 180/20

10-Zeller (aktive Elektrodenfläche: 25 cm²)

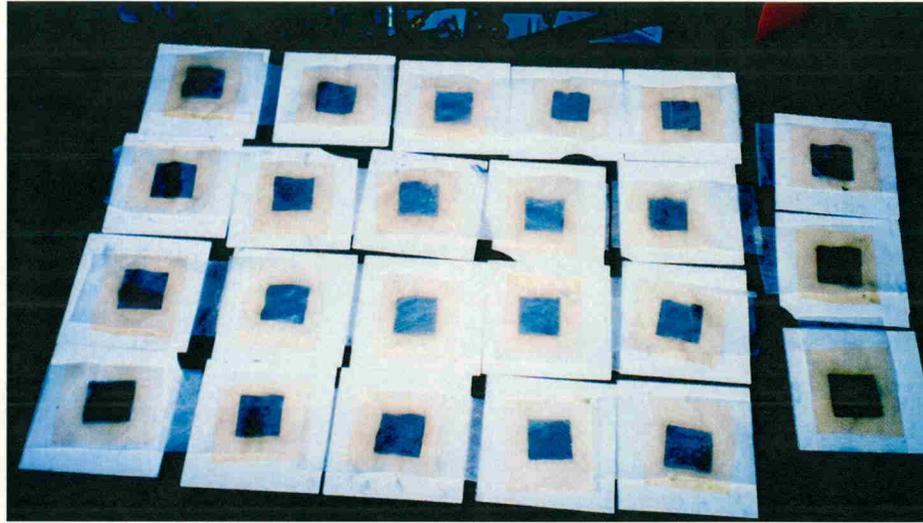
$\vartheta = 50\text{ }^\circ\text{C}$; Luftzufuhr = 7,5 Nl/min; Sauerstoff-Produktion > 0,315 Nl/min



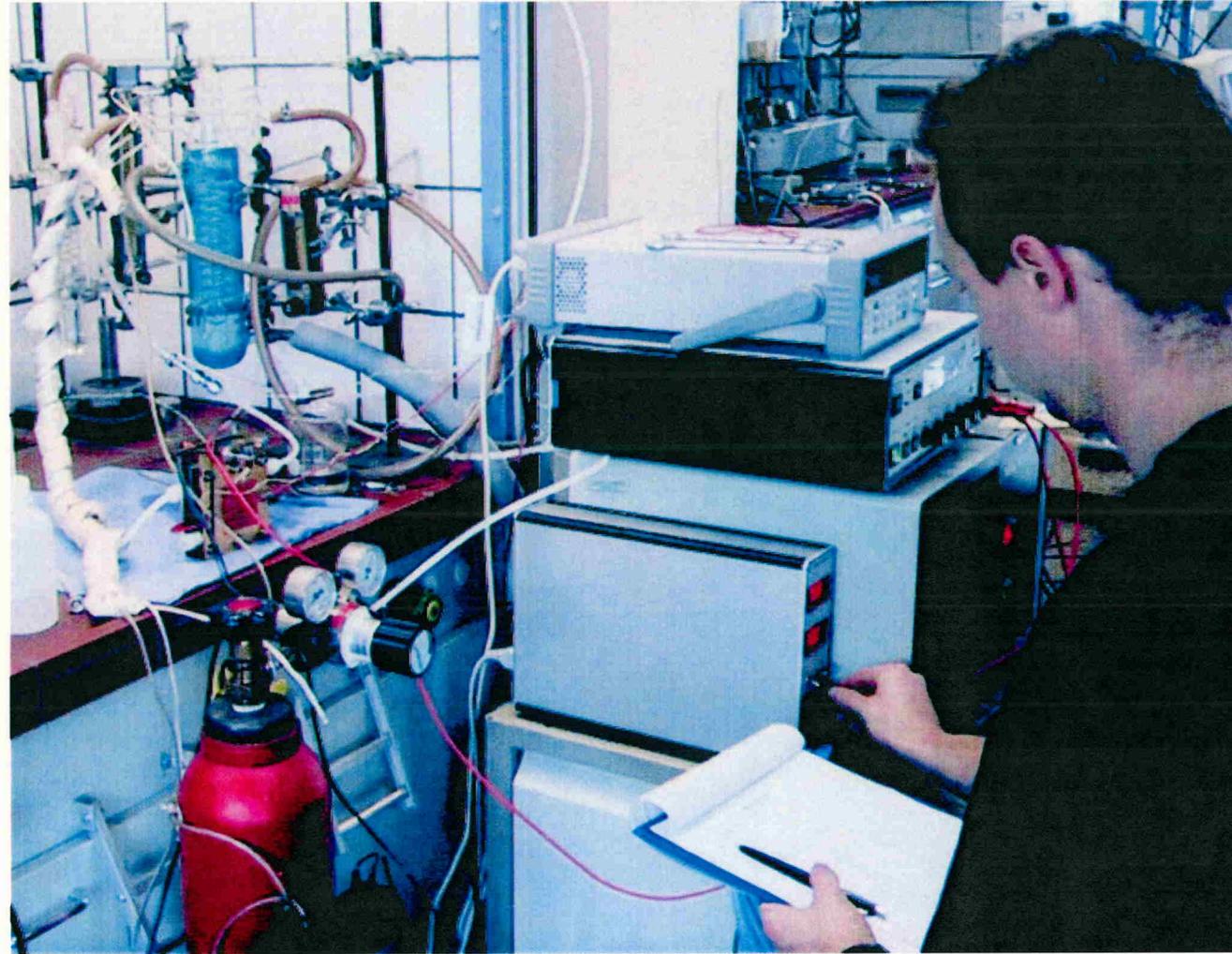
Testergebnisse Elektrolysezellen

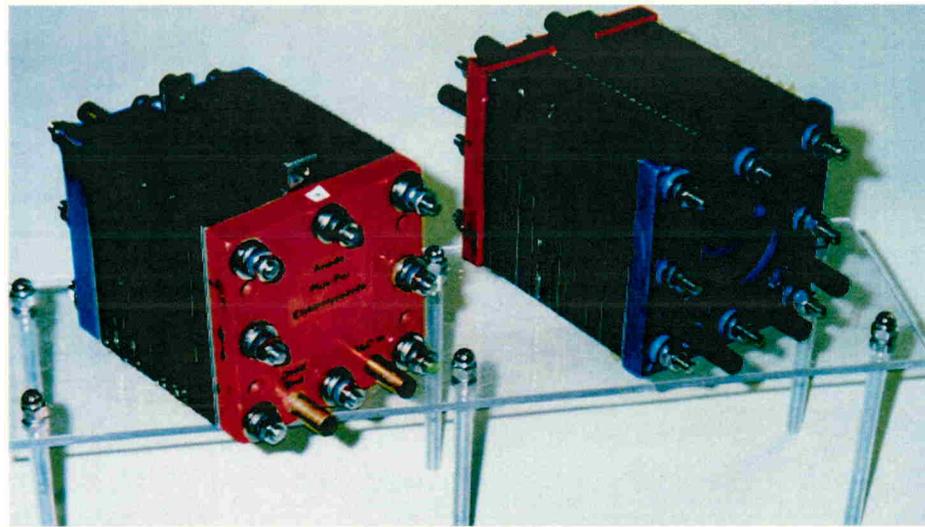


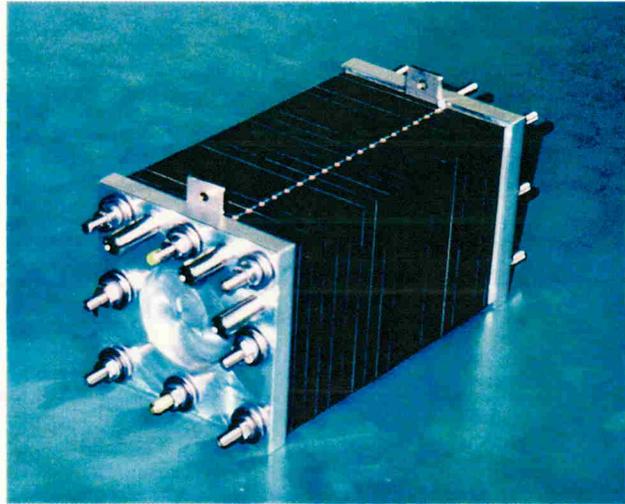
Testergebnisse Brennstoffzellen, 6 Zellen, 25cm²











**Brennstoffzellenprojekt
der
Studiengesellschaft Brennstoffzellen e. V.**

**in
Nürnberg**

Dr. - Carlo - Schmid - Straße



Gründungsidee und Ziele der Studiengesellschaft

- Die Idee zur Gründung
 - Zeichen setzen für rationale, sparsame und zukunftsweisende Energieverwendung und somit für den Umweltschutz.
 - Zielpartner Bayerische kommunale EVU und Verbände
- Ziele des Vereins
Erprobung eines Brennstoffzellen - Blockheizkraftwerkes im kommunalen Bereich
- Vereinsgründung
Anfang 1991
- Zukunftsperspektive
Beteiligungen z. B. an Projekten wie Wasserstoff-Initiative Bayern u. a.



Studiengesellschaft Brennstoffzellen e. V.

- Stadtwerke Ansbach
- Bayreuther Energie- und Wasserversorgung GmbH Bayreuth
- Stadtwerke Bochum GmbH Bochum
- Energie- und Wasserversorgung AG Nürnberg (Vorsitz)
- Stadtwerke Erding
- Erlanger Stadtwerke AG Erlangen (stellvertretender Vorsitz)
- Stadtwerke Freising
- Stadtwerke Fürth
- Stadtwerke Ingolstadt
- Stadtwerke Lindau
- Stadtwerke München
- REWAG, Regensburger Energie- und Wasserversorgung AG & Co.KG Regensburg
- Stadtwerke Rosenheim
- Stadtwerke Schweinfurt
- Stadtwerke Würzburg AG Würzburg
- Bayerngas GmbH München
- Erdgas Südbayern, Energieversorgung Inn-Salzach GmbH Waldkraiburg
- Verband der Bayerischen Gas- und Wasserwirtschaft e. V. München
- Technische Universität München
- Verband Kommunaler Unternehmen e.V. Landesgruppe Bayern München

Quelle:

TP 6.8.4/03-1998.06.25

Brennstoffzelle



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Die Projektbeteiligten

Gefördert vom

- Bayer. Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie und
- aus dem CO₂ - Minderungsprogramm der Stadt Nürnberg

Projekträger

- Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk in Nürnberg
Gesellschaft bürgerlichen Rechts (GbR) mit Haftungsbeschränkung

Gesellschafter der GbR

- Studiengesellschaft Brennstoffzellen e. V.
- EWAG Energie- und Wasserversorgung AG, Nürnberg
- Ruhrgas AG, Essen
- Saarberg Fernwärme GmbH, Saarbrücken

Sponsoren

- GEC ALSTHOM Energie GmbH, Nürnberg
- Erdgas Südbayern GmbH, München
- Austria Ferngas GmbH, Wien



Projektzeitplan

Brennstoffzelle

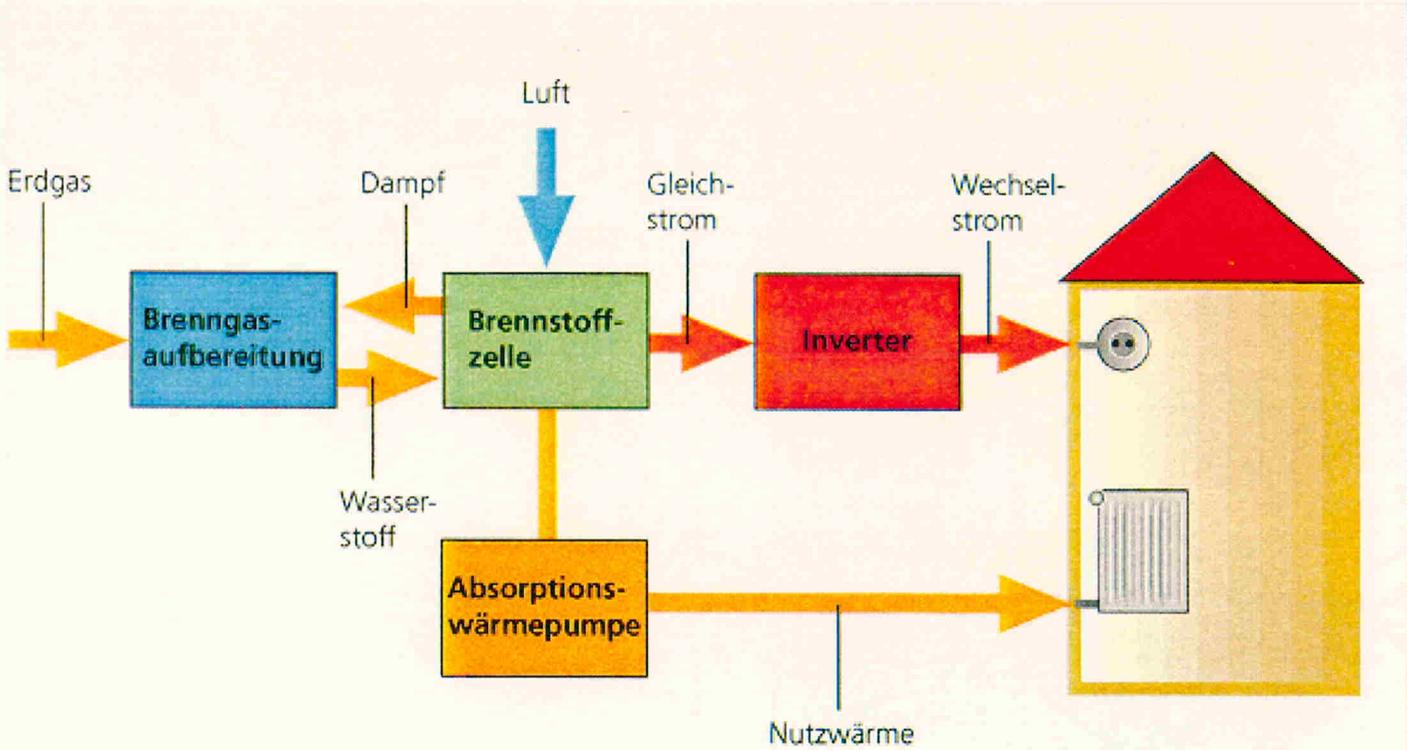
| | |
|----------------------|---|
| Anfang 1991 | Gründung der Studiengesellschaft mit dem Ziel den praktischen Einsatz eines Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerkes in einem kommunalen Unternehmen zu erproben |
| November 1995 | Beschluß der Studiengesellschaft über den Projektfahrplan Vorläufiger Förderantrag beim BSTMWVT |
| Frühjahr 1996 | <ul style="list-style-type: none">- Standort festgelegt- Verhandlung mit Auftragnehmern- Verträge und Bestellung vorbereitet |
| Herbst 1996 | Gründung der Projektgesellschaft (GbR m.b.H) Bestellung der BZ-Anlage (PC25C /ONSI, USA) Förderantrag beim BStMWVT |
| Frühjahr 1997 | Standort zur Montage der Anlage vorbereiten |
| 20.03.1997 | Erster Spatenstich mit Staatssekretär Spitzner |
| Herbst 1997 | Lieferung und Montage der Anlage Inbetriebnahme und Probetrieb |
| 23.01.1998 | Offizielle Inbetriebnahme mit Wirtschaftsminister Dr. Wiesheu |
| 1997-1999 | Messprogramm mit Auswertung |

Quelle:



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Brennstoffzelle



Quelle:

EWAG/FW/AP



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Standortdaten



Standortdaten der Wohnanlage Dr. - Carlo - Schmid - Straße

| | |
|--|-----------------------|
| Baujahr: | 1984 - 1996 |
| Beheizte Nutzfläche: | 59.730 m ² |
| Anzahl der Wohnungen: | 763 |
| Wärmeleistungsbedarf min./max: (mittlerer Bedarf pro Monat) | 215/1800 kW |

Heiznetz

| | |
|------------------------------|------------------|
| Installierte Leistung: | 5,4 MW |
| Vorlauf-/Rücklauftemperatur: | 70-100°C/45-55°C |

Quelle:

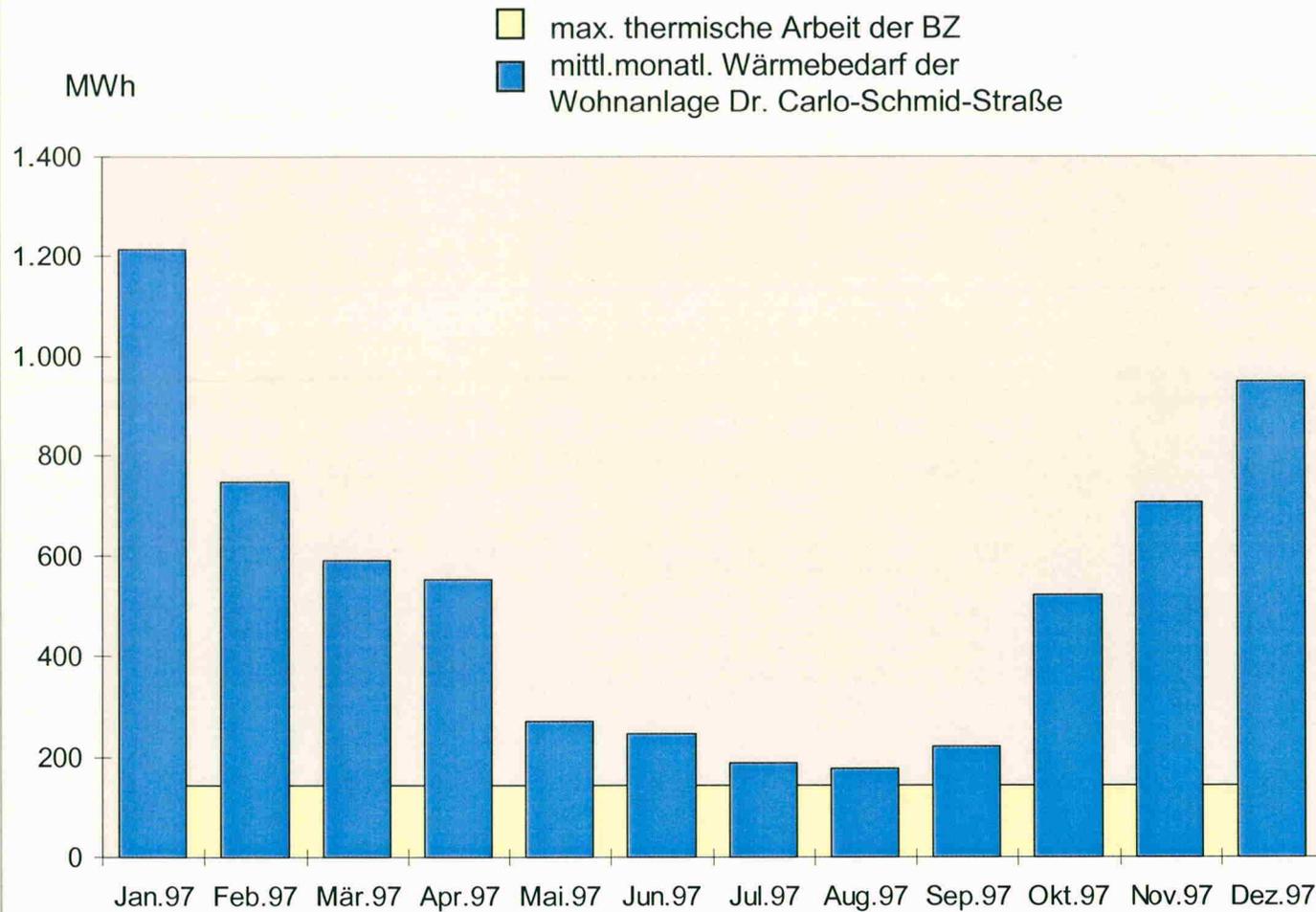
TP 6.8.4/06-1998.06.25

Brennstoffzelle



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Mittlerer monatlicher Wärmebedarf der Wohnanlage Dr.-Carlo-Schmid-Straße



Quelle: EWAG/FW

TP 6.8.4/09-1998.06.25

Brennstoffzelle

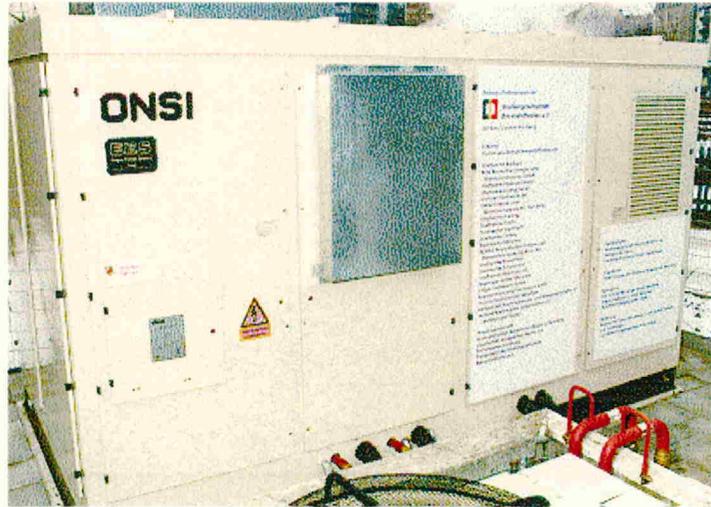
Mittlerer monatlicher Wärmeleistungsbedarf der Wohnanlage Dr.-Carlo-Schmid-Straße



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Technische Daten der BZ-Containereinheit PC 25 C

Brennstoffzelle



| | |
|---------------------|----------------|
| Hersteller: | Fa. ONSI (USA) |
| elektr. Leistung: | 200 kW |
| therm. Leistung: | 215 kW |
| Gesamtwirkungsgrad: | 85 % |
| Primärenergie: | Erdgas |
| Betriebstemperatur: | 205 °C |
| Maße (lxbxh): | 5,5mx3mx3m |

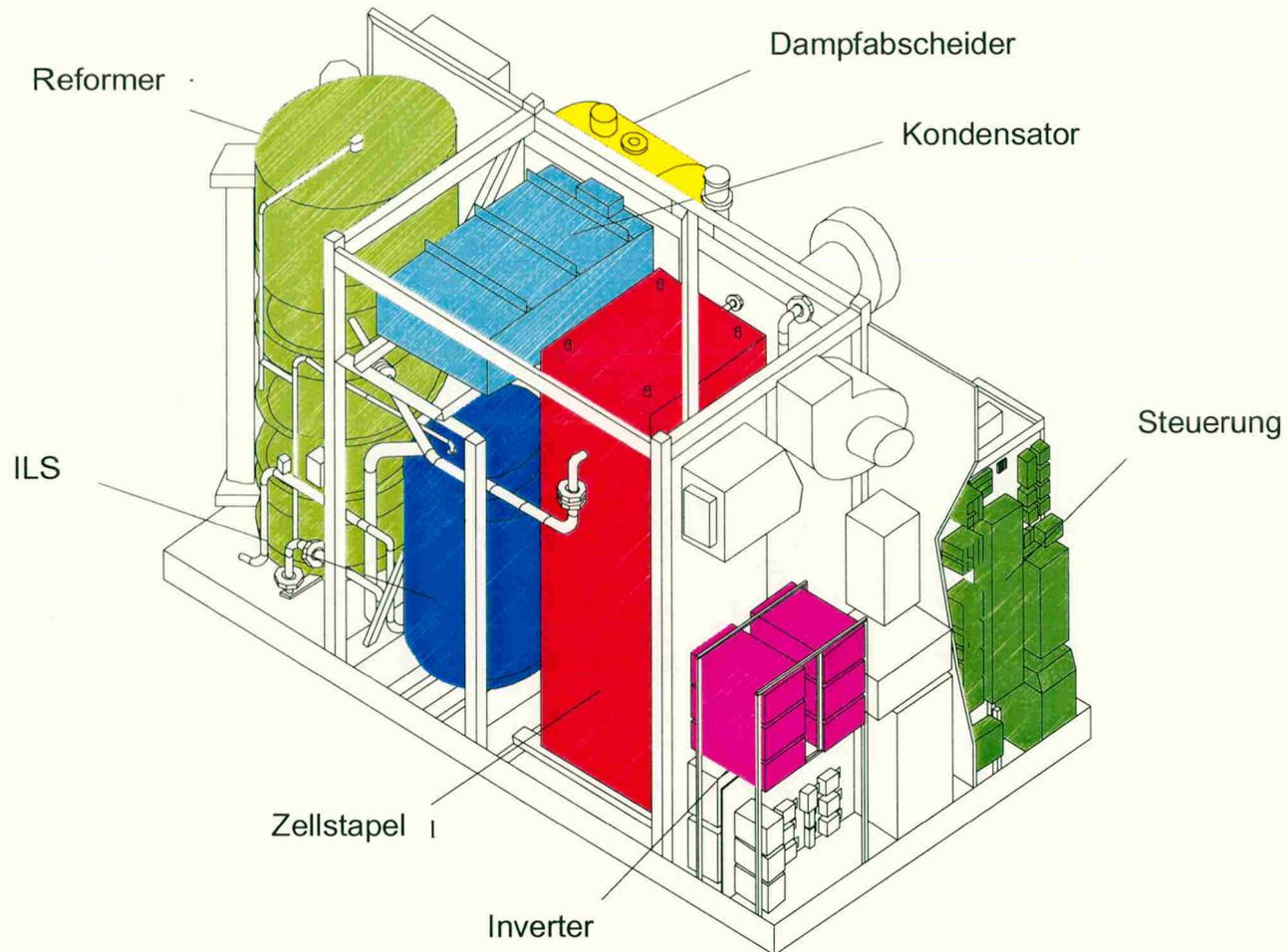
Versorgungsanteile für Beispieljahr 1997:

Die Anlage hätte bei 8000 Betriebsstunden ca. 25 % des Wärmebedarfs und ca. 55% des Strombedarfs der angeschlossenen Wohnanlage gedeckt



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Modell BZ-Container



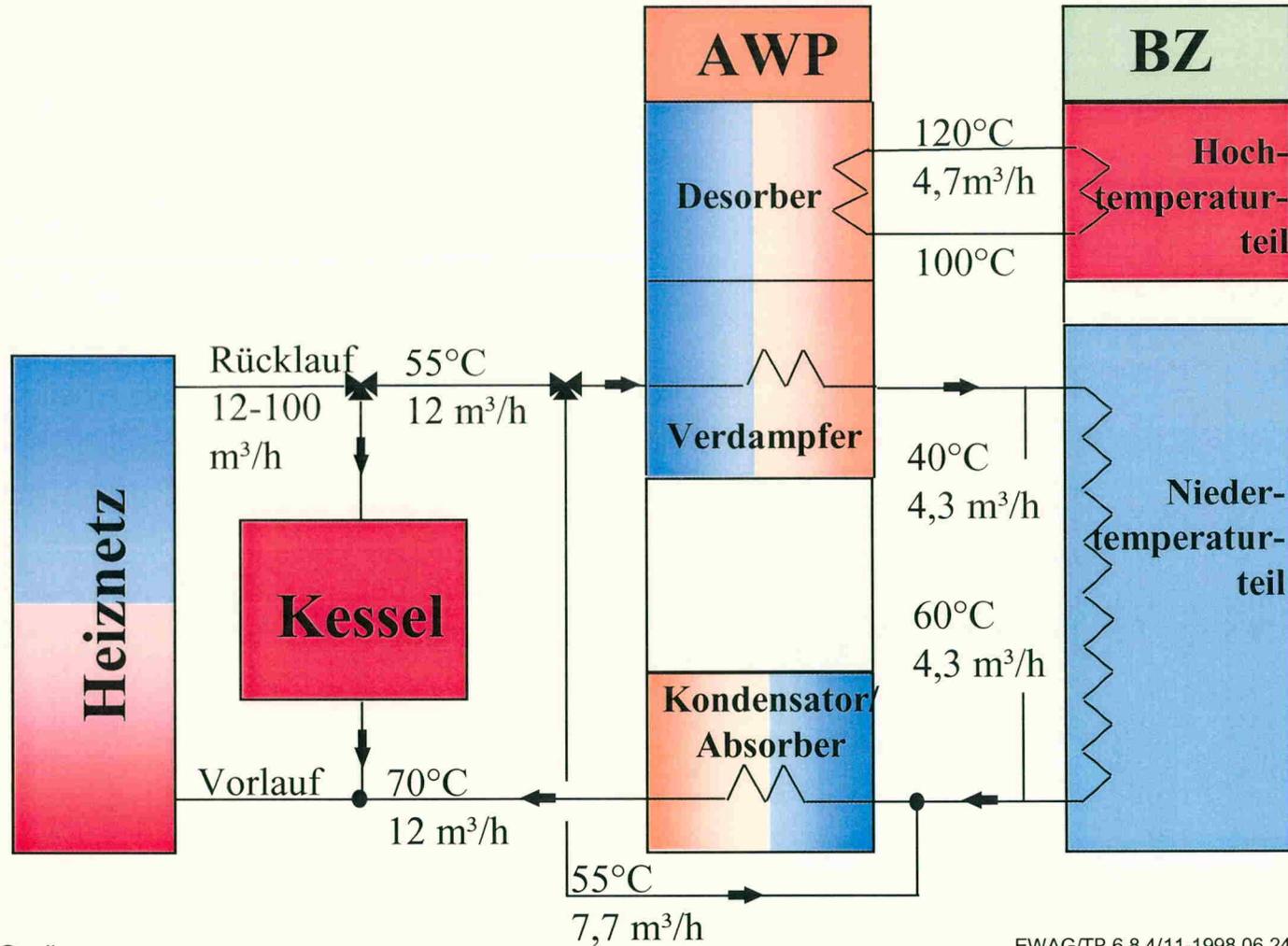
Quelle:

EWAG/TP 6.8.4/15-1998.05.14



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Thermodynamisches Schaltbild



Quelle:

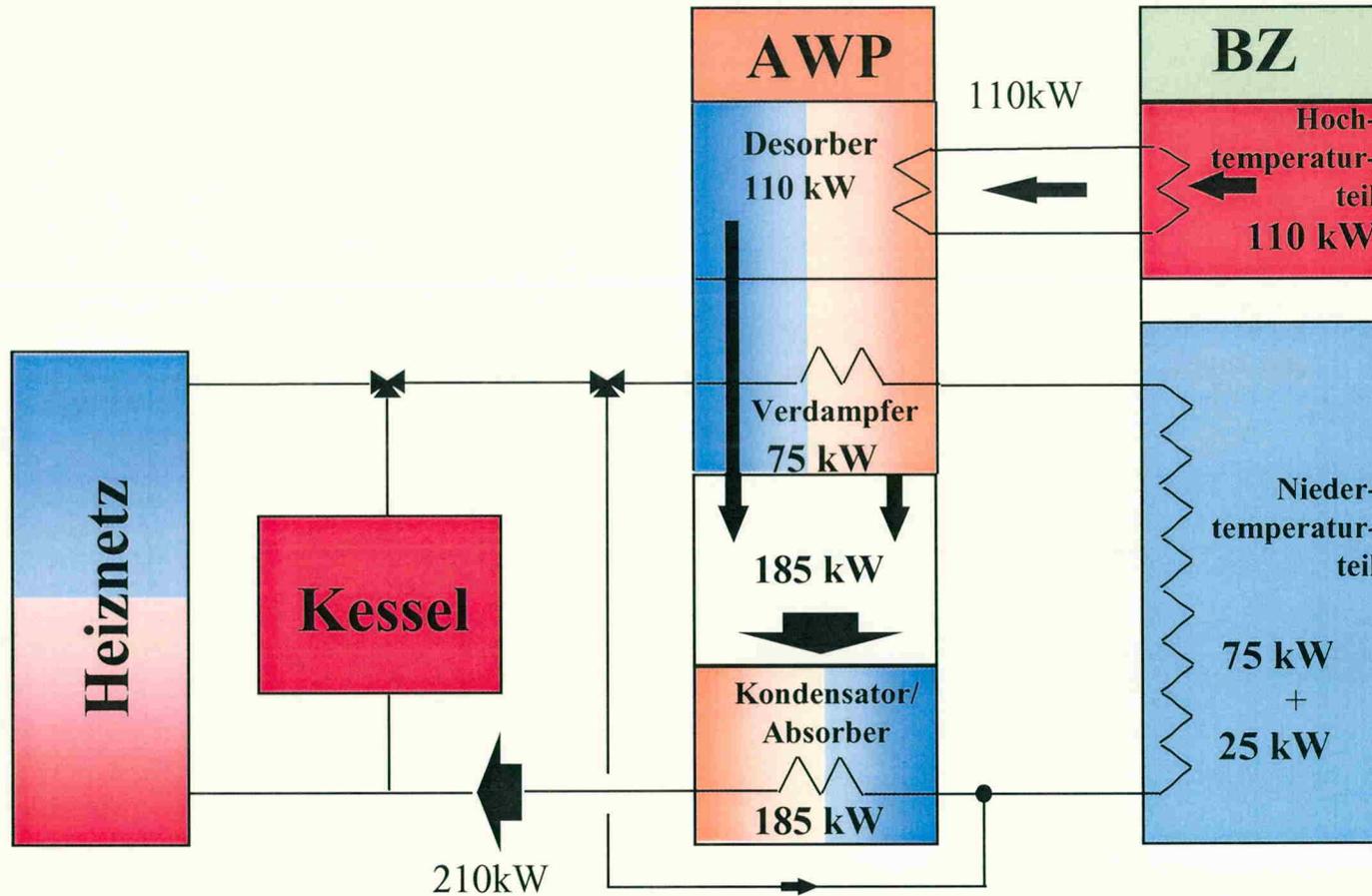
EWAG/TP 6.8.4/11-1998.06.24



Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Leistungsflüsse

Brennstoffzelle



Quelle:

EWAG/TP 6.8.4/12-1998.06.24

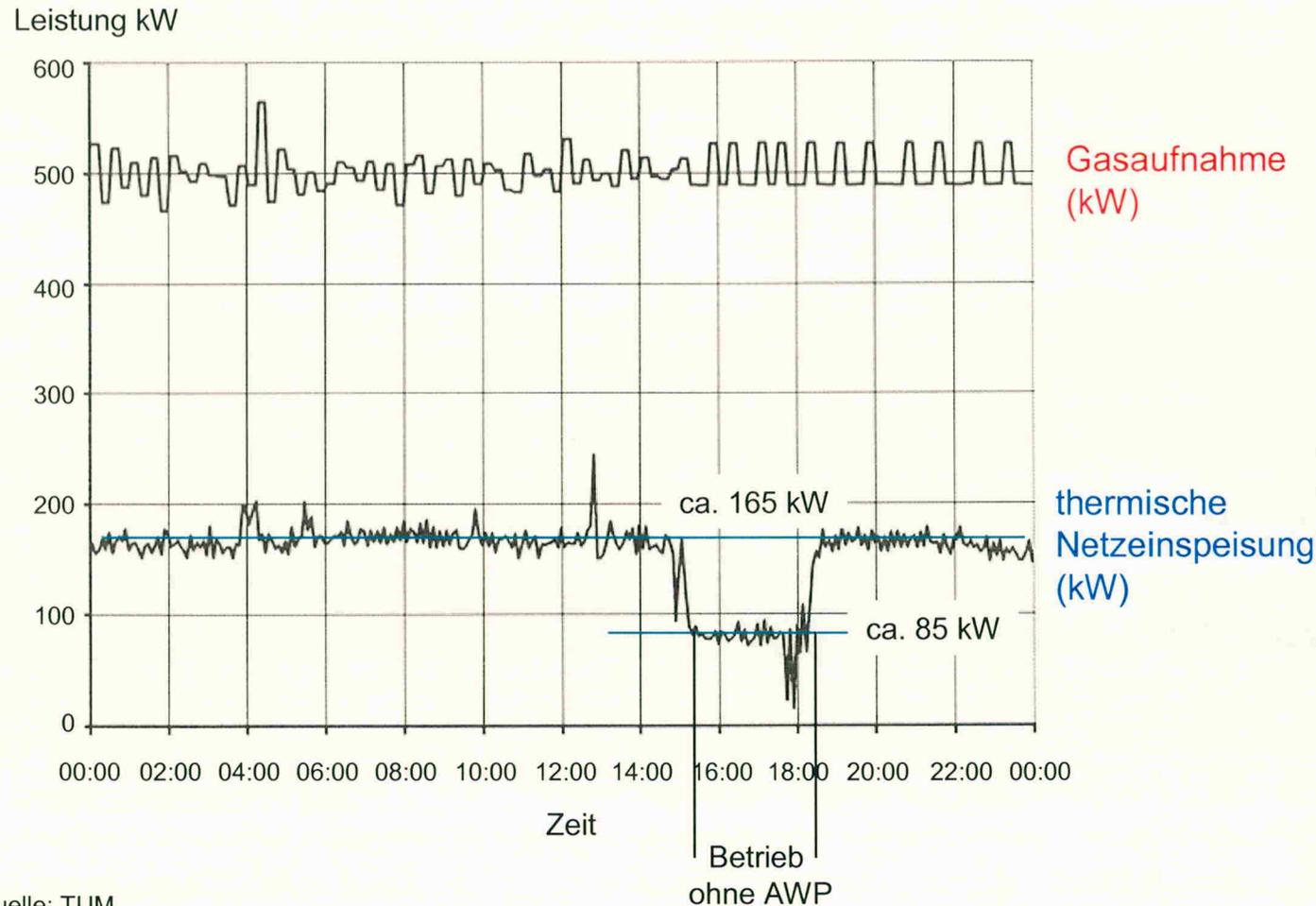


Studiengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

Verlauf der thermischen Netzeinspeisung bei einem Ausfall der Absorptionswärmepumpe

Brennstoffzelle

Verlauf der thermischen Netzeinspeisung bei einem Ausfall der Absorptionswärmepumpe (AWP)



Quelle: TUM,
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik
Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

TP 6.8.4/17-1998.06.25



Studengesellschaft
Brennstoffzellen e.V.

P & T Technologie AG

Vortrag: Power for a clean planet /

Wind genügt

Meine sehr verehrten Damen und Herren, ich darf mich vorstellen: Mein Name ist W. Schmidt, ich bin der Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung der Firma P&T Technology AG in Hamburg.

Strom aus Windenergie ist eine der umweltschonendsten Gewinnungsarten dieser vielseitig einsetzbaren Energie. Ist Strom als Energieträger in den Industrienationen eine tragende Säule des Wirtschafts- und Lebensprozesses, so ist dies in Entwicklungs- und Schwellenländern oft mit anderen Prioritäten belegt. Die Firma P&T hat sich zum Ziel gesetzt, die Versorgung von geographischen und energetischen Inseln mit Energie und Trinkwasser aus Meer-, Brack- und Citywasser zu versorgen.

Um überhaupt gedeihen zu können, braucht Leben zum Beispiel das Wasser. Strom ist in diesem Zusammenhang als nachrangig zu sehen. Allerdings kann der Strom in Verbindung mit einer umfangreichen Technik zur Schaffung von Wasser, Kühlung und Wärme zu einem sekundären Energieträger werden, der die Voraussetzung für das Leben schafft.

31 % der Weltbevölkerung leben an der 500.000 km langen Küste. In großen Teilen der Welt herrscht sowohl ein Mangel an elektrischer Energie als auch an Trinkwasser. Da an den Küsten Wind in einer Prognostizierbarkeit vorherrscht, bietet es sich an, Strömungsenergie durch Wind mittels Windkraftanlagen in Strom zu wandeln. Die Unstetigkeit des Windes wird in Industrienationen als negativ angesehen, da der Strom schlecht zu speichern und bei Bedarf abrufbar ist. Dieses Verhalten wird mit dem P & T System untersucht und verwirklicht.

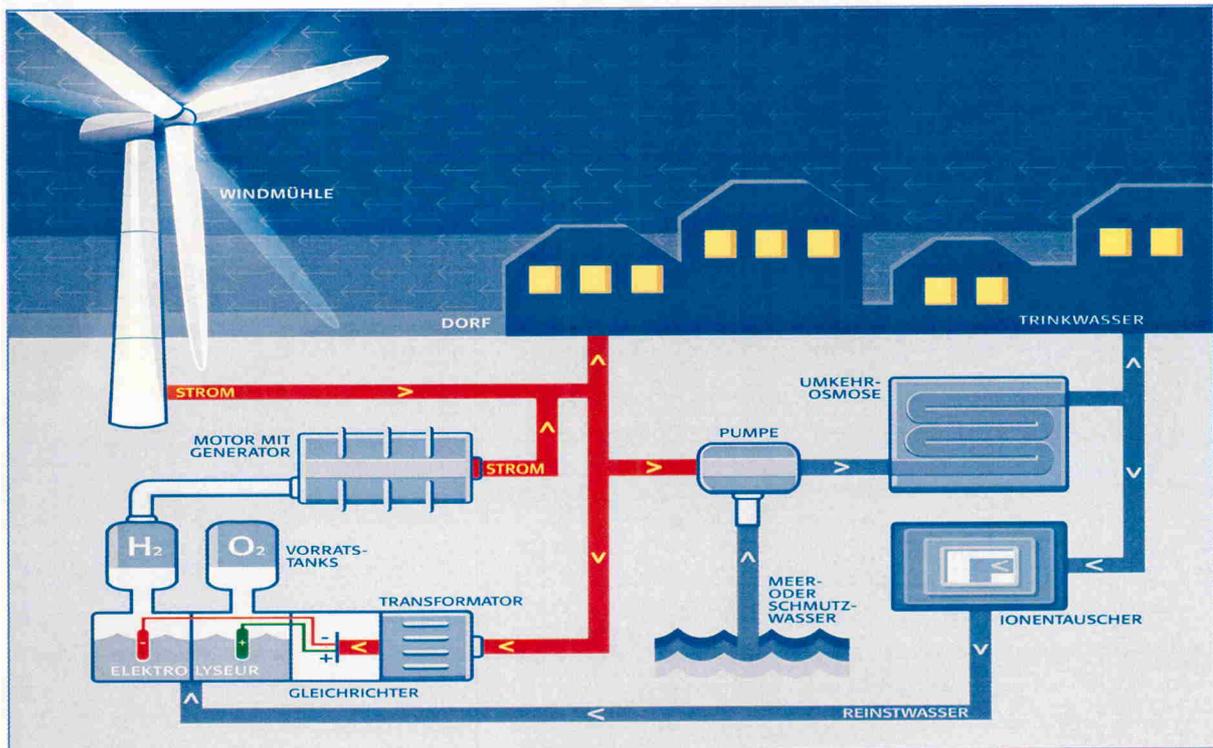
Warum haben wir uns für ein Wasserstoffsystem, zur Versorgung der Vorstehend genannten Anwendungsfälle entschieden? Weil die bekannten Batteriesysteme den Zyklen der Auf- und Entladung langfristig nicht standgehalten hätten, Wasserstoffsysteme aber eine Standzeit von 10 bis 15 Jahre erwarten lassen.

Bei der hier gezeigten Anlage dient der Wasserstoff als Zwischenspeicher. Die Komponenten hierzu wurden und werden Ihnen von den einzelnen Hersteller, im Laufe der Vortragsreihe näher erläutert.

Eine zweite Speichermöglichkeit neben der des Stroms ist die der Speicherung von dem Erzeugnisprodukt Trinkwasser.

Strom aus der Strömungsenergie Wind ist deshalb durch Nutzung entsprechender Techniken zur Energiespeicherung und Wasseraufbereitung – die Voraussetzung für das Leben gerade in den Schwellen- und Entwicklungsländern – hervorragend geeignet

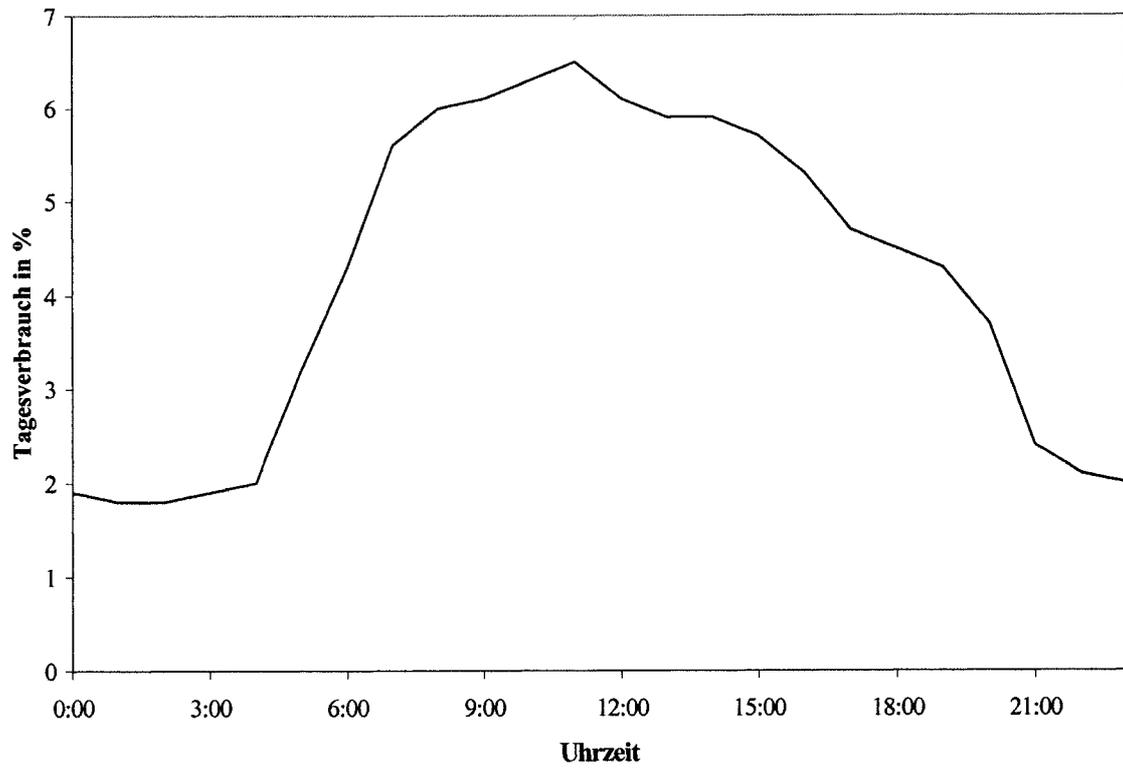
Wir stellen Ihnen hier die Trinkwasserversorgung in einem theoretischen Dorf in Norddeutschland vor.



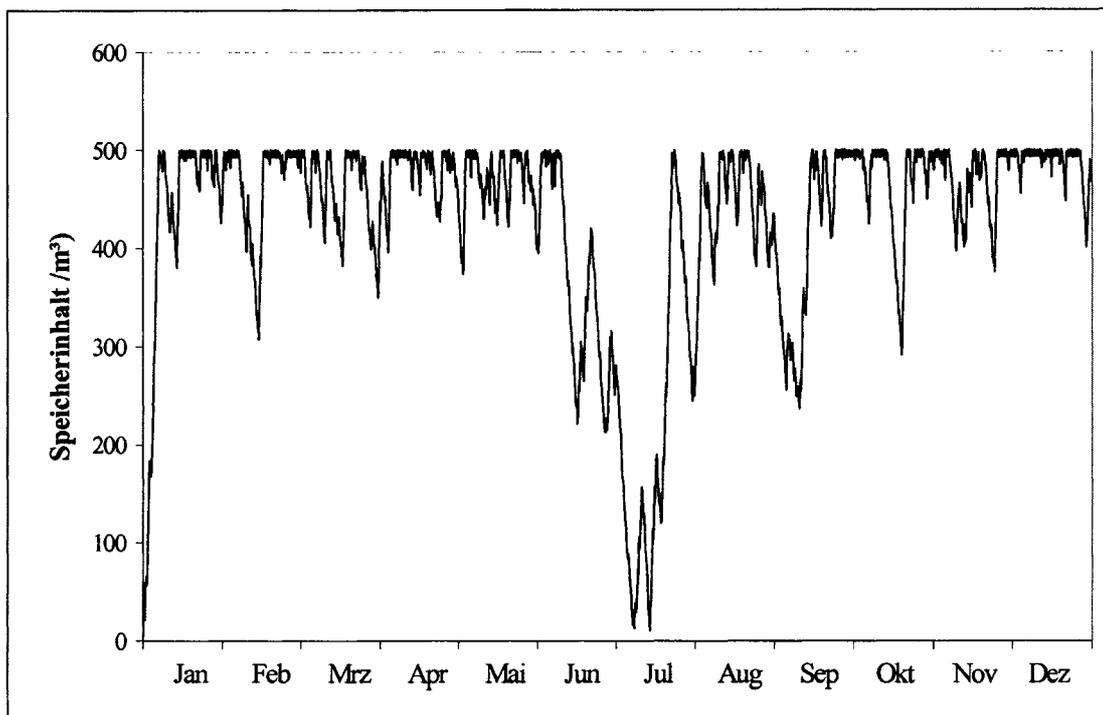
Prinzipschaltbild des P & T Systems

Im ersten Bild haben wir Ihnen das P&T-System in seiner Gesamtheit dargestellt. In diesem Flußbild können Sie die beiden Anwendungen erkennen. Der Teil 1 zeigt Ihnen die Möglichkeit der Systemanwendung Windkraftanlage und Wasseraufbereitung. Im zweiten Teil ist die Wasserstoffgewinnung und Wiederverstromung dargestellt.

Das zweite Diagramm stellt die Tagesganglinie einer Trinkwasserversorgung in einem Modelldorf in Norddeutschland dar. In diesem Modelldorf wurde eine Einwohnerzahl von 500 Personen vorausgesetzt. Des weiteren wurde in dem Quartier vorausgesetzt, daß ein Bäcker, Metzger und 2 landwirtschaftliche Betriebe ansässig sind. Diese Mischstruktur zeigt aber auch, daß sich ein solches Quartier in seinem Verhalten gleich einer städtischen Struktur verhält. In der Zeit von 11.00 bis 12.00 Uhr ist der größte Trinkwasserbedarf.



Tagesgang des Trinkwasserbedarfs (Haushalt), Modellgemeinde Norddeutschland



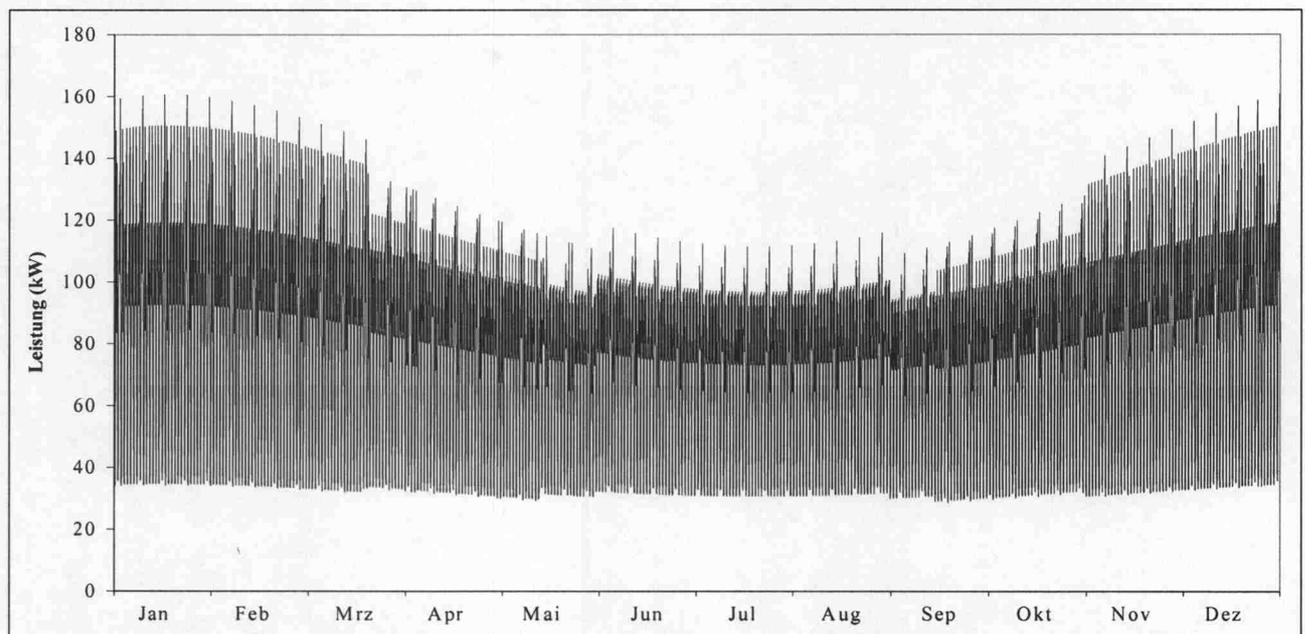
Trinkwasser-Speicherverlauf der optimalen Systemauslegung (Norddeutschland)

Der zugehörige Trinkwasserspeicher benötigt in den Monaten Juni und Juli ein Fassungsvermögen von 600 m^3 ; dies ist auch gleichzeitig das max. Volumen, für das der Speicher ausgelegt sein muß.

Soviel zur Trinkwasserversorgung.

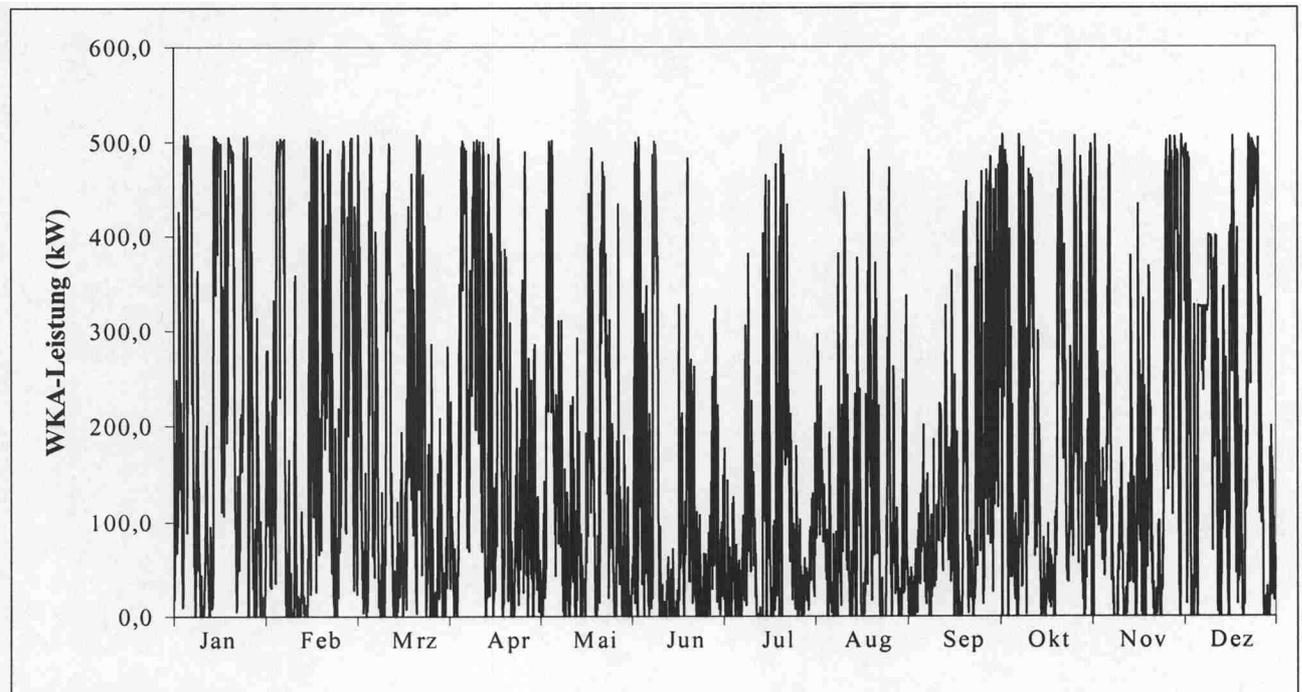
Ich komme nun zum Thema der elektrischen Versorgung ländlicher und städtischer Gebiete in Entwicklungs- und Schwellenländern. Hier erfolgt die Versorgung zur Zeit in erster Linie mit fossilen Brennstoffen. Diese Brennstoffe wiederum fordern von den Volkswirtschaften dieser Länder 70 % ihres Bruttosozialproduktes. Diese Kosten können durch die Anwendung von windkraftbetriebener Wasserstoffgewinnung minimiert werden. Es werden nur die Investitionskosten und die Wartungskosten benötigt.

Betrachten wir auch hier wieder die Versorgung mit Windkraft an einem Modellstandort in Norddeutschland, so stellen wir auch hier fest, daß die Lastschwankung zu den unterschiedlichen Jahreszeiten eminent sein kann.



Jahreslastgang des elektrischen Energiebedarfs einer Modellgemeinde in Norddeutschland

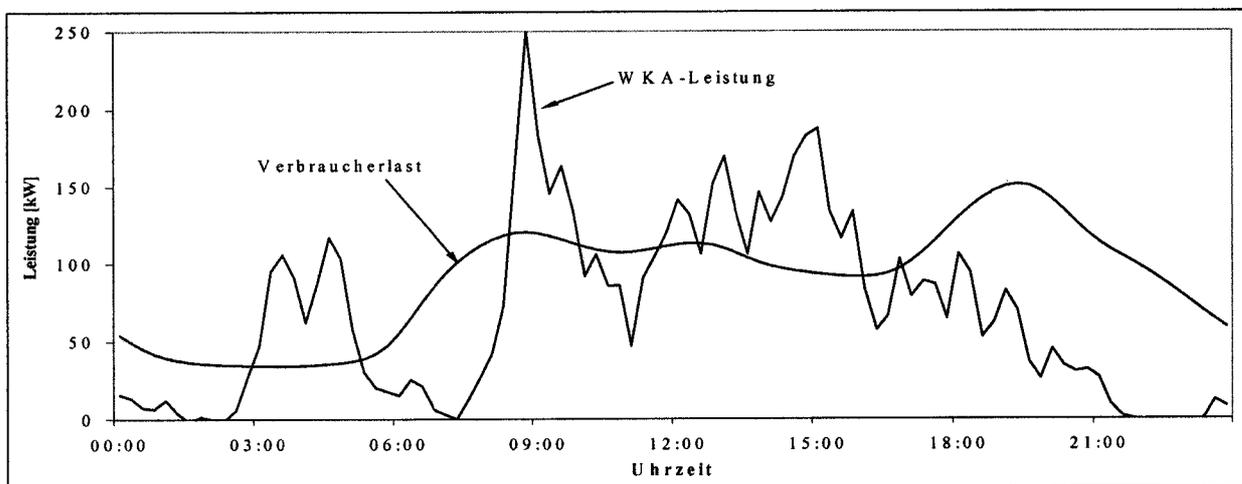
Eine realistische Windkraftanlage in der Nähe dieses vorher dargestellten Modelldorfes zeigt ähnliche gravierende Schwankungen.



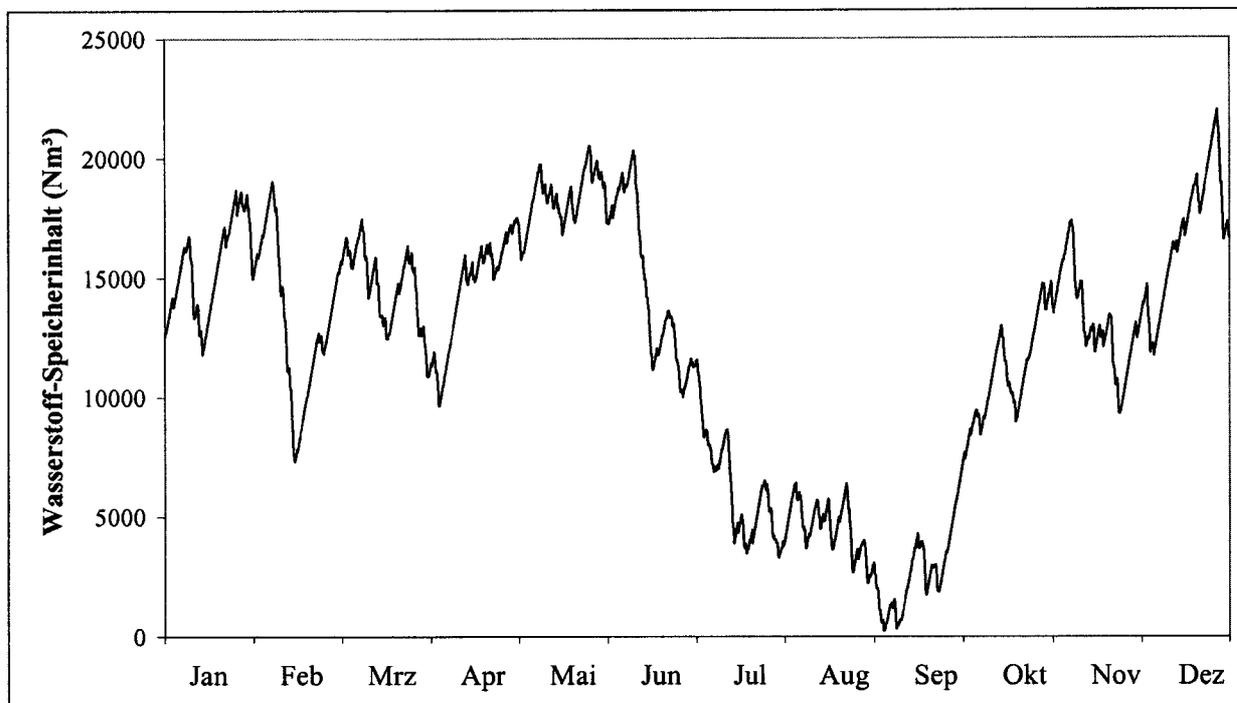
Verlauf der WKA-Leistung Norddeutschland (Reußenköge, Enercon E-40)

Lösen wir die Jahresganglinie durch eine Tagesganglinie einmal auf, so stellen wir fest, daß die Tagesganglinie einen ähnlichen Verlauf nimmt.

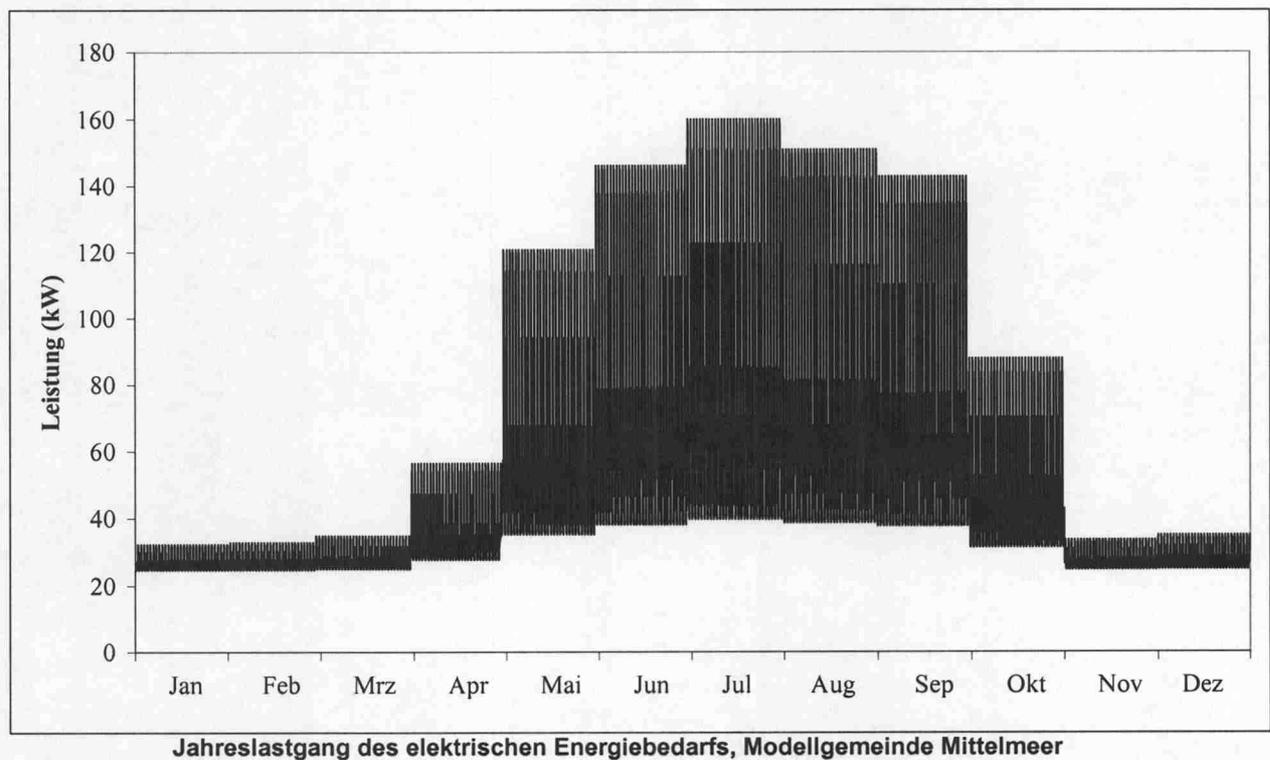
Dies ist eine wichtige Erkenntnis, nämlich daß innerhalb des Tages Zeiten entstehen, in denen die Windkraftherzeugungslinie die Verbrauchsganglinie überschreitet. Dies wiederum ist der Bereich, der zur Speicherung der Energie verwendet werden kann, d. h., der Elektrolyseur wird zugeschaltet. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, eine konstante Erzeugung zu erreichen, wenn in den Zeiten freier Erzeugungskapazität der Elektrolyseur als Verbraucher an das Netz geschaltet wird und so die Energie gespeichert werden kann.



Typische Elektrizitätsverbrauchskurve, Tagesgang WKA-Leistung
(15 Min.-Mittelwerte)



Wasserstoff-Speicherverlauf der optimalen Systemauslegung (Norddeutschland)



Die vorstehende Modellgemeinde Mittelmeer ist für eine Gemeinde mit einem Hotelbetrieb untersucht worden. Dies ist auch der Grund für jahreszeitliche Spitzen.

Die Netzstrukturen in den bisher autark betriebenen Netzen stellen sich wie folgt dar:

- dezentral regionale Inselnetze sowie
- lokal durch die Versorgung netzferner Verbraucher- und Lastgruppen

Generell stellt die dezentrale Energieversorgung lokaler, kommunaler und regionaler Strukturen durch Bildung und Ausweitung von Inselnetzen weltweit ein Einsatzpotential dar, das eine großmaßstabliche Einführung der regenerativen Energie in Form von Wasserstoff verspricht. Der Anwendungsbereich erstreckt sich von der lokalen Inselnetzversorgung größerer Lastgruppen und kleiner Gewerbebetriebe mit Mindestleistung im kW-Bereich bis hin zur Versorgung städtischer Gebiete und industrieller Regionen. Voraussetzung für diese autarke Versorgung mit Windkraftanlagen ist allerdings eine gesicherte unterbrechungsfreie Energieversorgung. Dies wiederum kann mit einer Wasserstoffgewinnung und anschließender Zwischenspeicherung sichergestellt werden.

Um verbrauchsgerechte Energiekonzepte mit regenerativen Energien erstellen und auf ökonomische Weise Versorgungsaufgaben lösen zu können, sind fallspezifische Informationen notwendig.

Hierzu zählen:

- lokale, regionale und meteorologische Bedingungen,
- Kenntnisse über Verbrauchs- und Bedarfsstrukturen, über geforderte Energie und Leistung sowie Prognose zur zukünftigen Entwicklung,

- topographische Daten, Energie- Übertragungsstruk-turen und Netz-Ausweitungsmöglichkeiten,
- Angaben über elektrische Eigenschaften (Nennwerten, Betriebsverhalten, Dynamik vorhandener und neu integrierbarer Versorgungsanlagen),
- Kosten der Anlage, der Energie-Übertragungssysteme sowie Betriebskosten

Die Möglichkeiten zur Kopplung von Inselnetzen und zur Anbindung an das Verbundnetz setzt eine Reihe von technischen Anforderungen an den Systemaufbau voraus. Inselstrukturen sollten daher von Anfang an netzanbindungsfähig konzipiert und aufgebaut werden. Dies hat positive Auswirkungen auf die Beschleunigung der Vernetzung, insbesondere auf die anfallenden Kosten im gesamten Versorgungsumfeld.

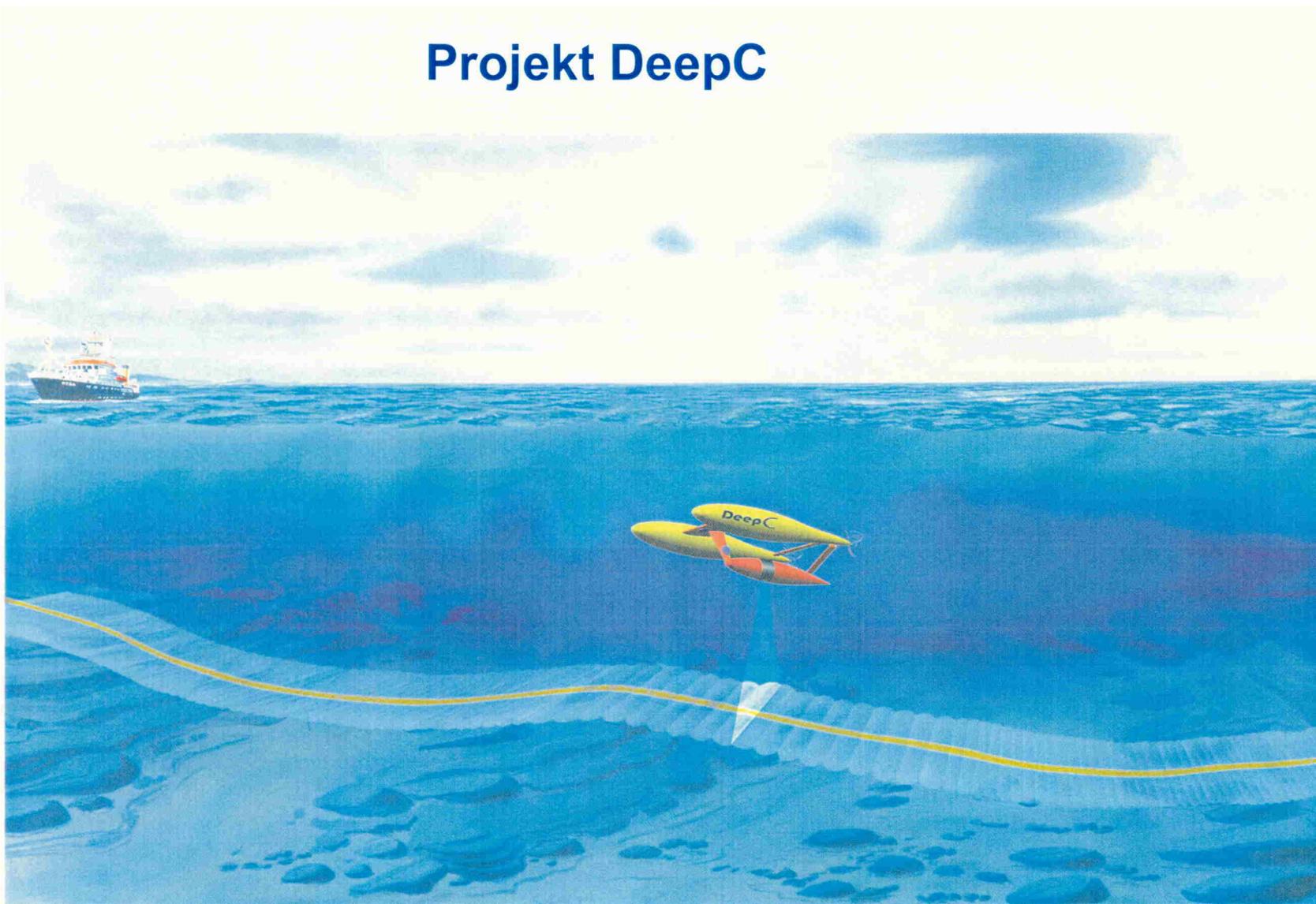
Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen “Energieversorgung mit Brennstoffzelle“



**Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen
“Energieversorgung mit Brennstoffzelle“**



Projekt DeepC





Parameter DeepC

- **Verdrängung :** ca. 2000 kg
- **Nutzlast :** ca. 300 kg
- **Geschwindigkeit :** 4 kn max. 6 kn
- **Tauchtiefe :** 4.000 m
- **Missionszeit :** 60 h
- **Reichweite :** 400 km
- **steuerbar in allen 6 Freiheitsgraden bei allen Geschwindigkeiten**



Vergleich von Li-Ionen-Sekundärbatterien mit Brennstoffzellenanlage

| Speichertyp | gravimetr. Energied. Wh/ kg | volumetr. Energied. Wh/ L | Investitionskosten (im DeepC u. BTE bzw. Ladeg.) für 200 kWh H2 bzw. 120 kWh Elektro. / TEuro | Reaktantenkosten für 200 kWh H2 bzw. 120 kWh Elektro. / TEuro |
|---|-----------------------------|---------------------------|---|---|
| Li-Ionen-Batterie | 140 | 110 | 200 | 0,2 |
| <ul style="list-style-type: none"> • O2 250 bar • H2 350 bar nicht außen-druckbelast-bar • BZ | 200 | 105 | 125 | 0,5 |

Wesentliche vorteilhafte Merkmale einer Brennstoffzellenanlage

hohe Leistungs- und Energiedichten

konstante Leistungsabnahme bis zum Ende der Energiebereitstellung

exakte Bestimmung des Energieinhaltes

langandauernder wartungsfreier Betrieb ohne merkbare Energieverluste im Ruhezustand

keine Beeinflussung der Umwelt durch Schadstoffemissionen

**Energieinhalt = H₂ - Energie (ca. 1,7- fache E - Energie);
dagegen beinhalten Li- Ionen - Batterien die 5 - fache
E - Energie**

Theoretischer Vergleich der Energiedichten verschiedener Speicherarten von Wasserstoff

Theoretischer Vergleich (ohne Behälter)

| Speicherart | Gravimetrische Energiedichte kWh / kg | Volumetrische Energiedichte kWh / L |
|--|--|--|
| Flüssig | 33,33 | 2,36 |
| Druck 350 bar | 33,33 | 0,81 |
| Druck 750 bar | 33,33 | 1,41 |
| Metallhydrid | 0,83 | 2,61 |
| Wassereaktive Hy- dride z. B. LiH | 2,78 | 4,06 |



Theoretischer Vergleich der Energiedichten verschiedener Speicherarten von Sauerstoff

Theoretischer Vergleich (ohne Behältnis)

| Speicherart | Gravimetrische Speicherdichte kg O ₂ / kg | Volumetrische Speicherdichte kg O ₂ / L |
|----------------------------|--|--|
| Flüssig | 1 | 1,13 |
| Druck 250 bar | 1 | 0,36 |
| Druck 350 bar | 1 | 0,45 |
| Wasserstoffperoxid 50 % | 0,28 | 0,34 |
| Wasserstoffperoxid 70 % | 0,38 | 0,48 |
| Wasserstoffperoxid 90 % | 0,46 | 0,61 |



Auswahl und Festlegung der Speichermethoden

Auf der Grundlage des Vergleiches praktischer Speicherverfahren für Wasserstoff wird die

Druckspeicherung von Wasserstoff und Sauerstoff

im bestehenden Vorhaben favorisiert.

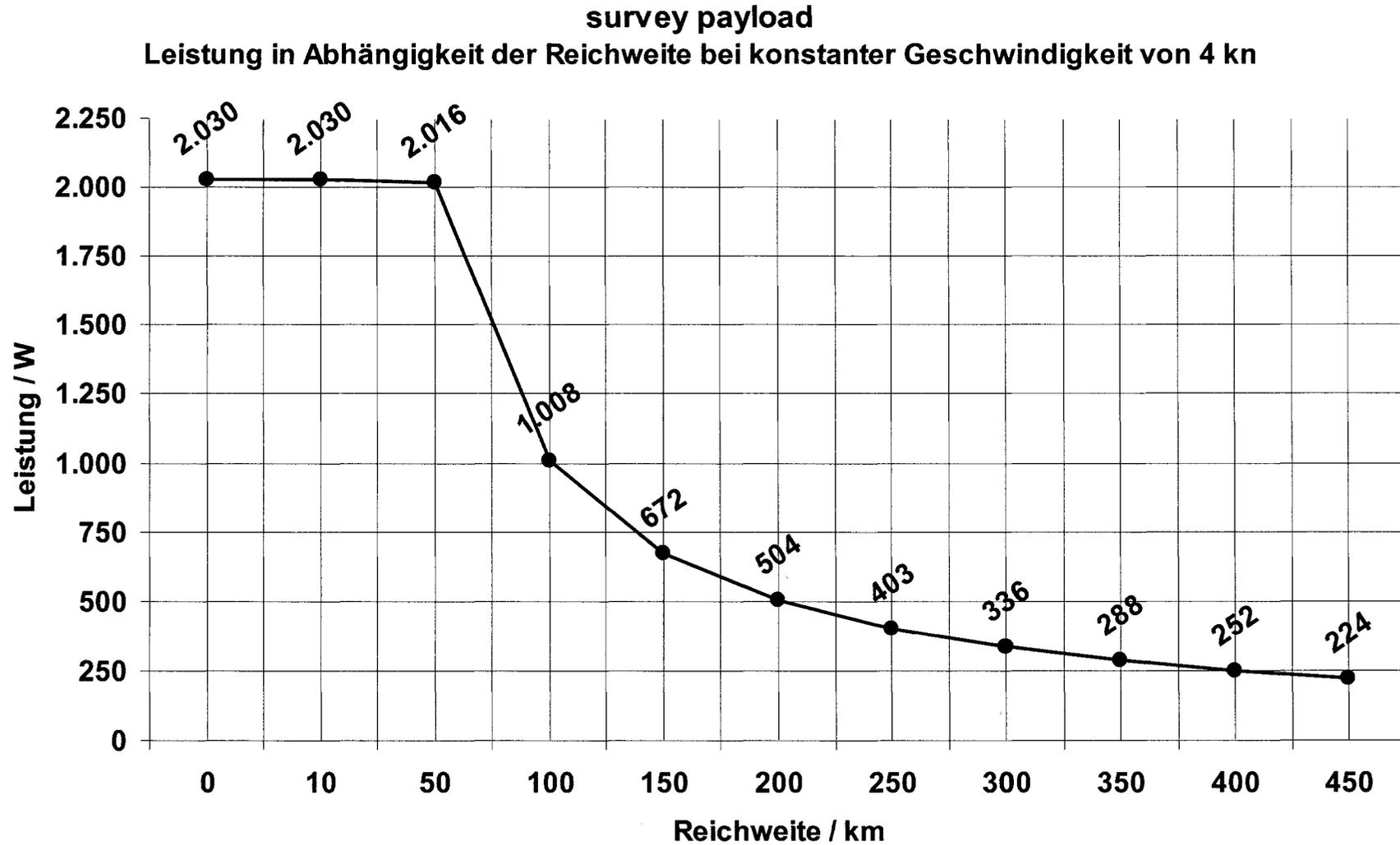


Derzeitiger Stand der Innovationen im Bereich der Brennstoffzellenanlagen und Speichertechnik

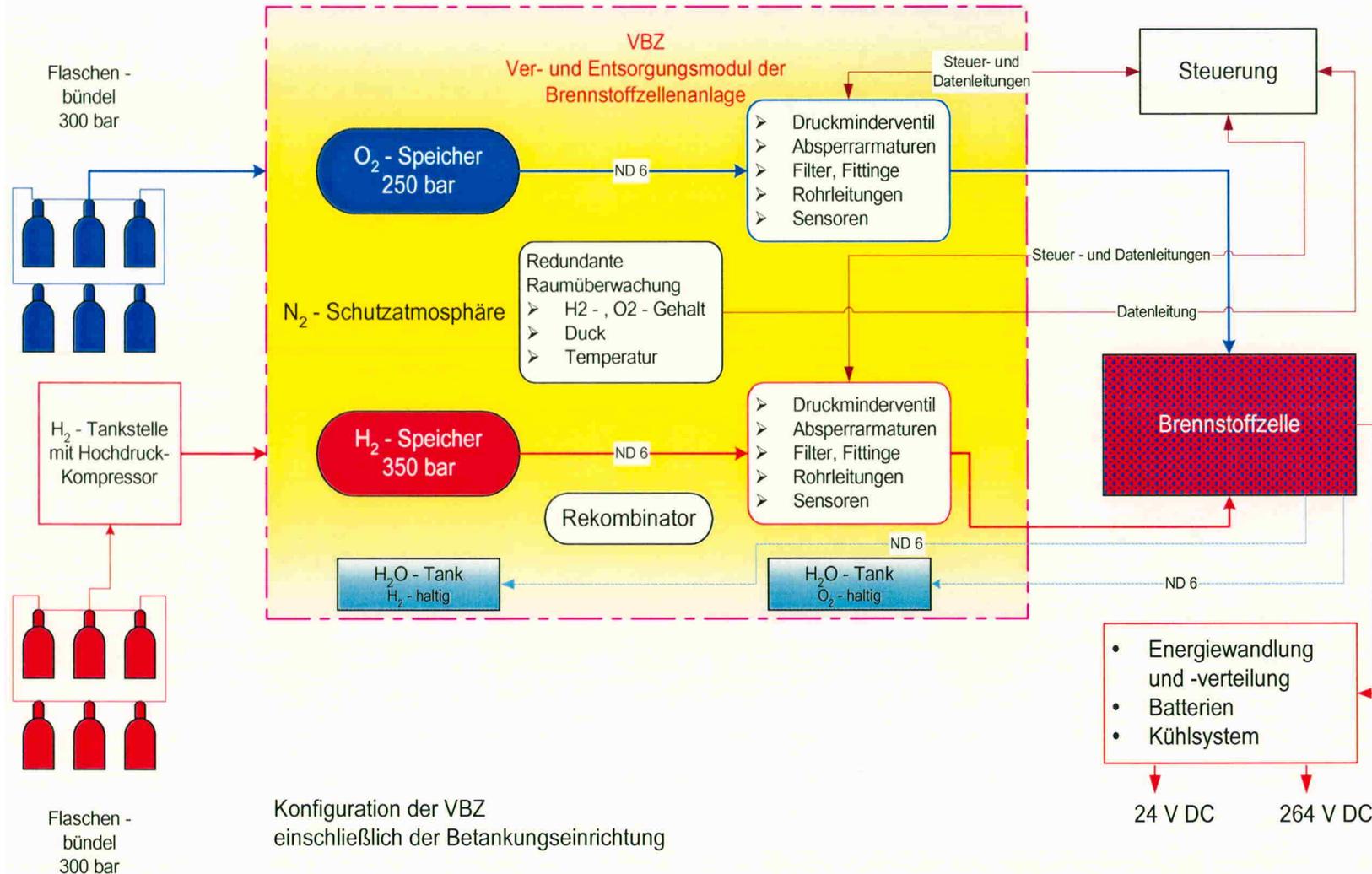
- Brennstoffzellen < 5 kW : Wirkungsgrad 50 % bei Nennlast
- Speicher für H₂ + O₂ bestehend aus Hochdruckspeicher 350 bar – CFK-Komposit-Behälter (Inliner Alu)
- Die Energieversorgung beansprucht den größten Teil des zur Verfügung stehenden Volumens und Gewicht :
 - Volumen ca. 800 L, davon die Speicher ca. 700 L
 - Gewicht : ca. 400 kg

Damit hängt die Reichweite bzw. Nutzlast des AUV im Wesentlichen von der Energiedichte der Speicher ab.

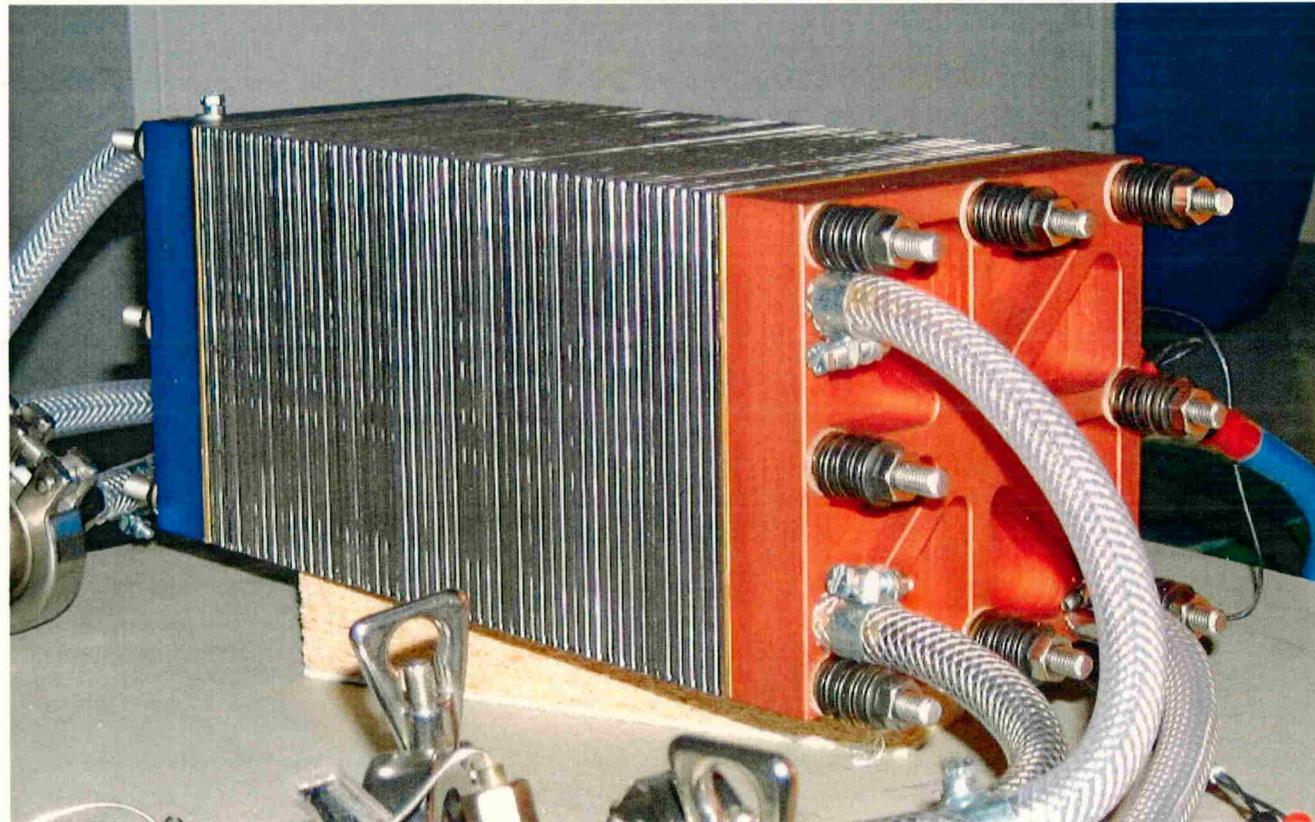
Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen
"Energieversorgung mit Brennstoffzelle"



Konfiguration der Energieversorgung



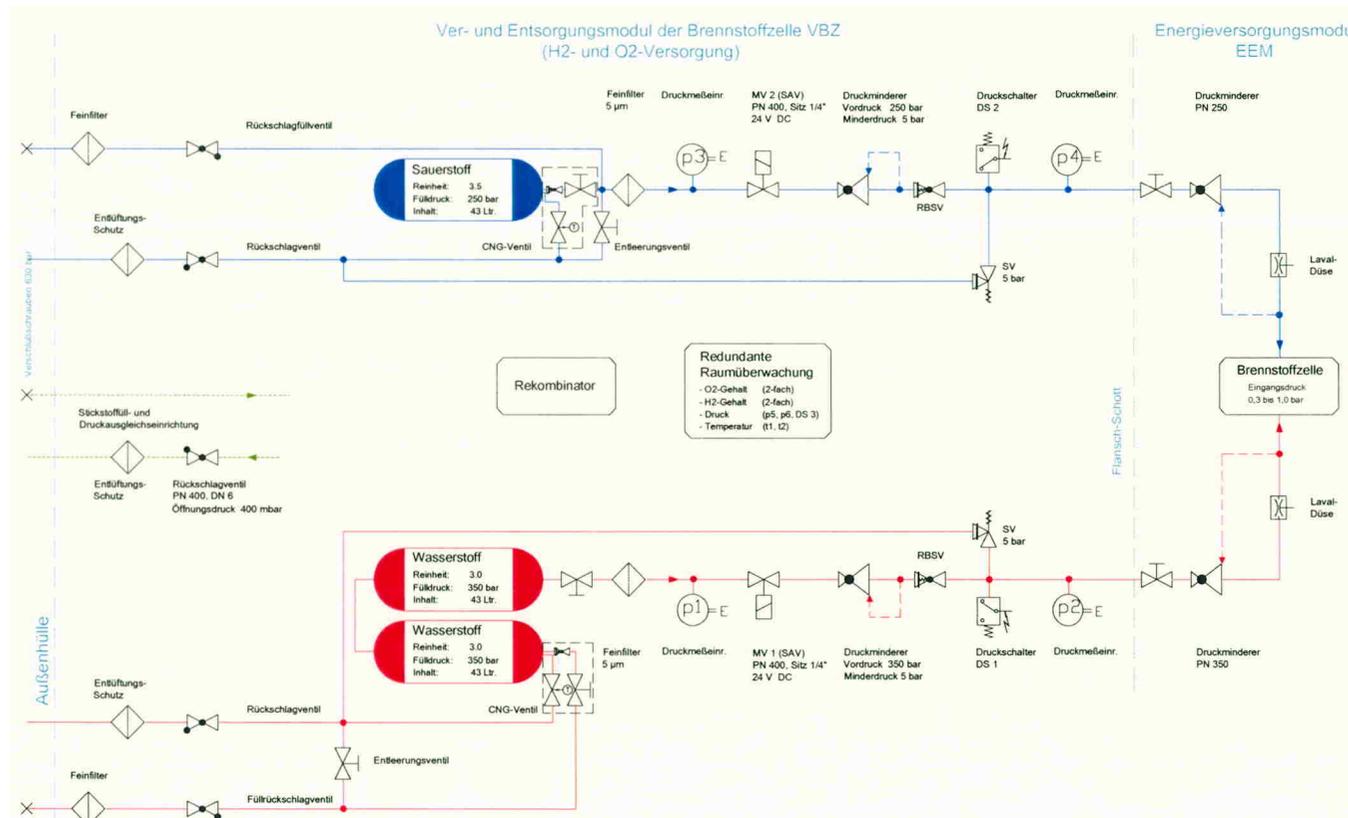
60 - zelliger Brennstoffzellenstack



Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen “Energieversorgung mit Brennstoffzelle“



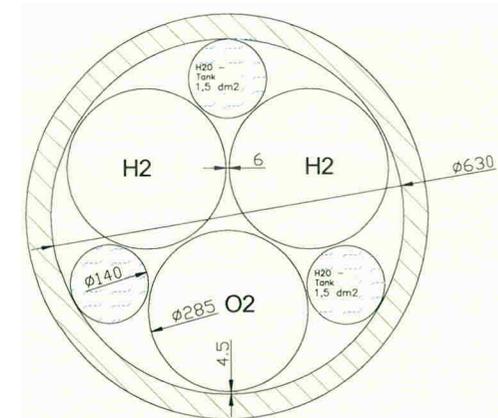
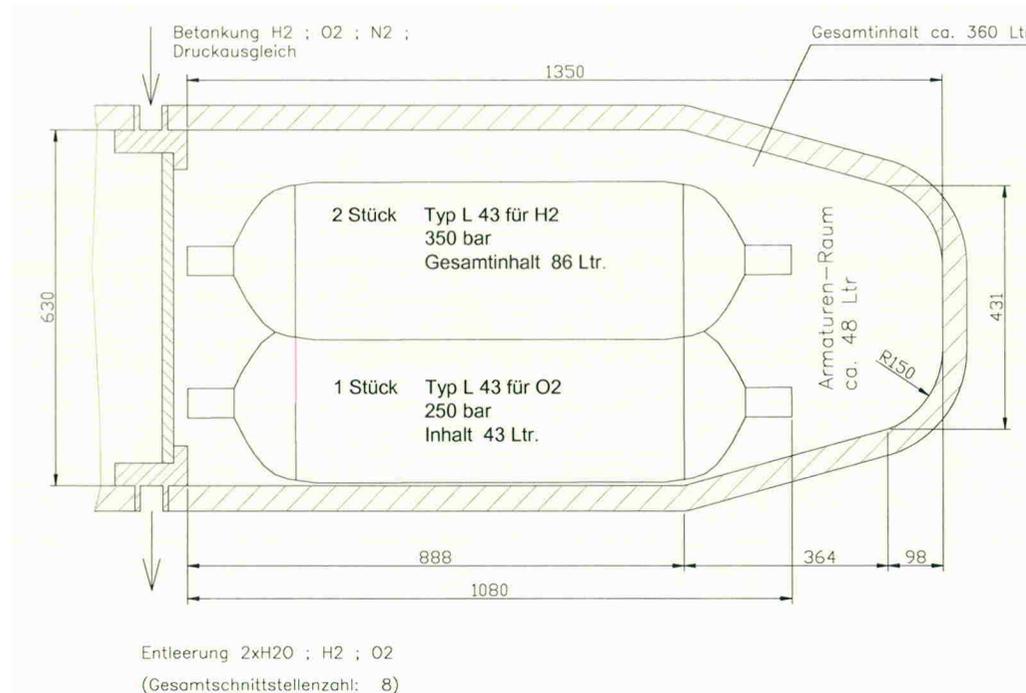
Gasversorgung



Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen "Energieversorgung mit Brennstoffzelle"



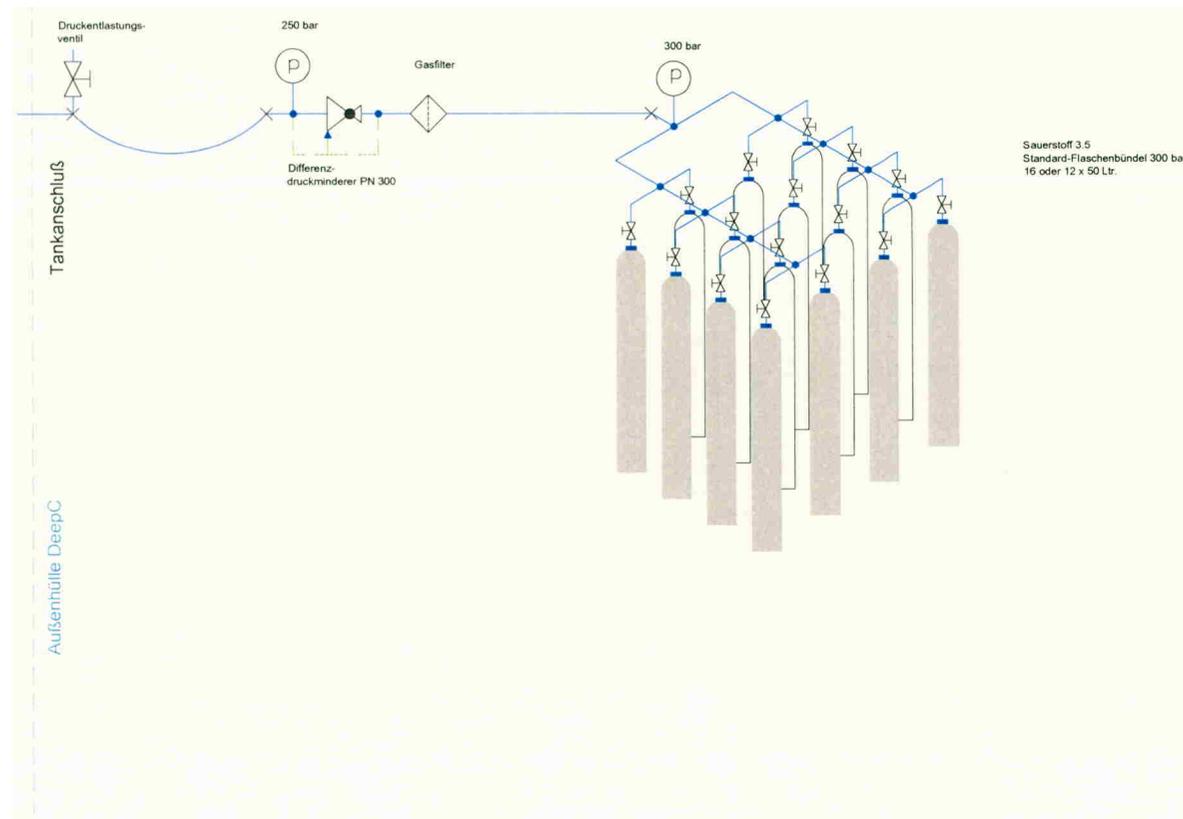
Anordnung der Ver- und Entsorgung der BZ



Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen “Energieversorgung mit Brennstoffzelle“



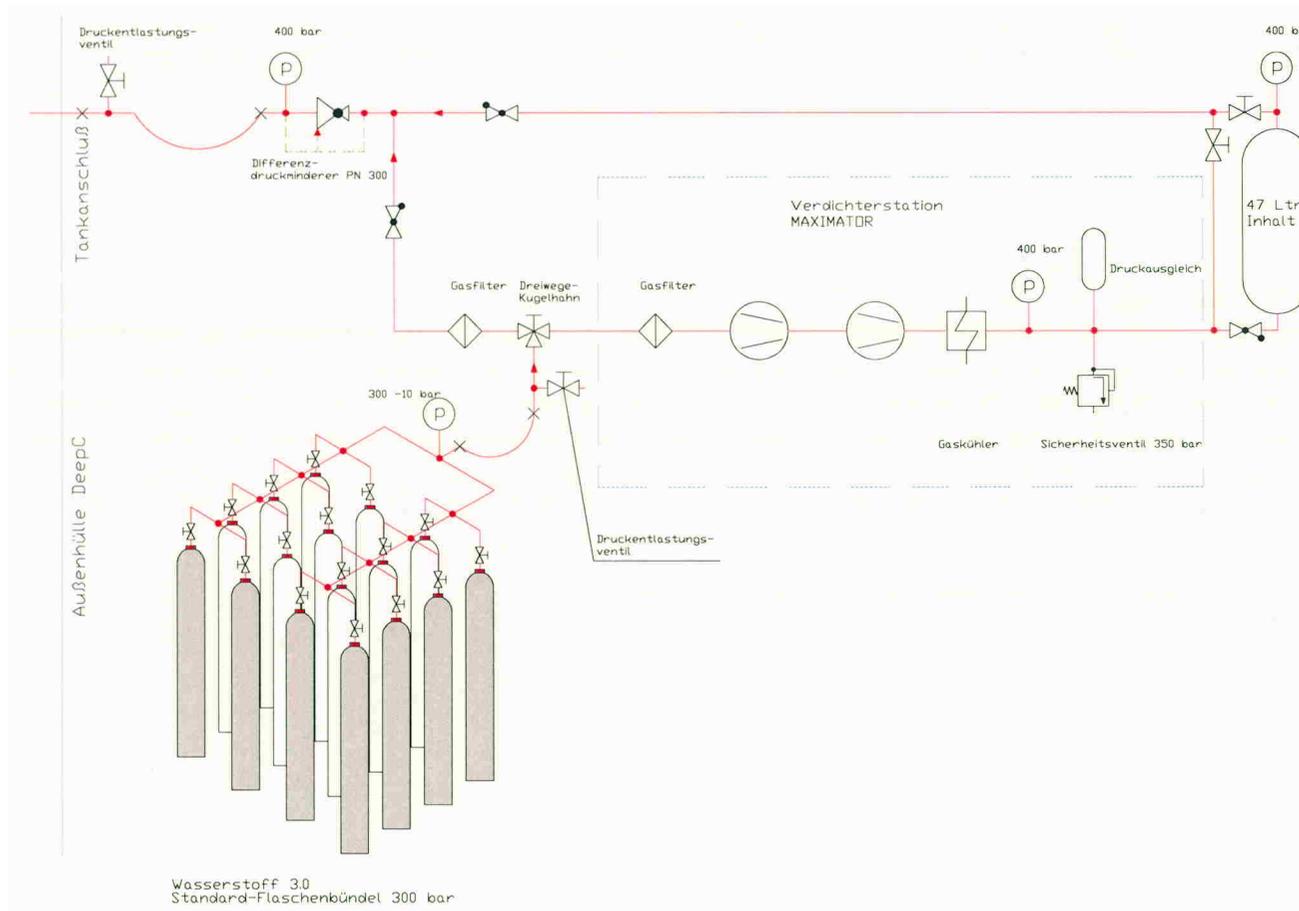
Betankung ohne Kompressor



Aktiv autonomes Unterwasserfahrzeug für große Tauchtiefen “Energieversorgung mit Brennstoffzelle“



Betankung mit Kompressor





Ausblick - Potenziale

Geringere Geschwindigkeiten könnten zu größeren Reichweiten führen.

Im Nutzlastmodul könnte noch eine Brennstoffzellenanlage mit einer Wasserstoffenergie von ca. 50 kWh integriert werden.

Neuartige Speichermethoden



Vergleich der Energiedichten verschiedener Speichersysteme für Brennstoffzellen bei 200 kWh- H2- Energie und BZ- Leistung von 3,6 kW

| Speichertyp | gravimetr. Energied. Wh/ kg | volumetr. Energied. Wh/ L | Investitionskosten (im DeepC u. BTE bzw. Ladeg.) für 200 kWh H2 bzw. 120 kWh Elektro. / TEuro | Reaktantenkosten für 200 kWh H2 bzw. 120 kWh Elektro. / TEuro |
|---|-----------------------------|---------------------------|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • O2 350 bar • H2 350 bar außendruckbelastbar • BZ | 350 | 200 | 150 | 0,5 |
| <ul style="list-style-type: none"> • O2 350 bar • H2 750 bar außendruckbelastbar • BZ | 420 | 260 | 170 | 0,5 |



Vergleich der Energiedichten verschiedener Speichersysteme für Brennstoffzellen bei 200 kWh - H₂- Energie und BZ - Leistung von 3,6 kW

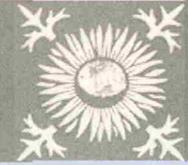
| Speichertyp | gravimetr. Energied. Wh/ kg | volumetr. Energied. Wh/ L | Investitionskosten (im DeepC u. BTE bzw. Ladeg.) für 200 kWh H ₂ bzw. 120 kWh Elektro. / TEuro | Reaktantenkosten für 200 kWh H ₂ bzw. 120 kWh Elektro. / TEuro |
|--|-----------------------------|---------------------------|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • O₂ 350 bar • H₂ LiH geschl. System, nicht außendruckbelastbar • BZ | 410 | 370 | 175 | 3 |
| <ul style="list-style-type: none"> • O₂ 350 bar • H₂ LiH offenes System, druckneutral • BZ | 450 | 280 | 175 | 3 |



MTU Schmelzkarbonat Brennstoffzelle in der Rhön-Klinikum-AG

**Dipl.- Ing. M. Scherer
Dipl.- Ing. J. Demmler**

**RHÖN-KLINIKUM AG
Techn. Controlling / Umwelt
Salzburger Leite 1
97616 Bad Neustadt
E-Mail: tc@rhoen-klinikum-ag.com
Web: www.rhoen-klinikum-ag.de/umwelt**



- ▶ **Erster börsennotierter Krankenhausbetreiber in Deutschland**
- ▶ **25 Krankenhäuser an 16 Standorten**
- ▶ **Über 10.000 Mitarbeiter**



- ▶ **Als Institution, die der Erhaltung und Wiederherstellung von Gesundheit dient**
 - ist uns der Schutz der Umwelt ein besonderes Anliegen.
 - ist jede unnötige Belastung der Umwelt und damit der Gesundheit zu vermeiden.

- ▶ **Innovationsfähigkeit**
 - ▶ ist einer der wesentlichen Erfolgsfaktoren der Rhön-Klinikum AG.
 - ▶ Hierzu gehört auch die Bereitschaft zur Übernahme von Vorreiterpositionen - nicht nur im medizinischen Bereich.

- ▶ Wir verfolgen die Entwicklung von Brennstoffzellen bereits seit einigen Jahren. Bisher verfügbare Anlagentypen sind für den Einsatz im Krankenhaus weniger geeignet.
- ▶ Das "Hot Module" der Firma MTU scheint uns aufgrund verfolgten Ansatzes einer systematischen Vereinfachung der Konstruktion das Potential zu haben, auch kommerziell erfolgreich zu werden. (1200€ pro KW_{el})



- ▶ **Energiekonzept der Rhön-Klinikum AG:**
 - ▶ 8 errichtete Blockheizkraftwerke in den letzten 10 Jahren
 - ▶ 2 in Bau
 - ▶ 1 in Planung
 - ▶ 1 Wasserkraftwerk

- ▶ **Eigenerzeugung von:**
 - ▶ etwa 2/3 Strombedarfes
 - ▶ fast 50% des Wärmebedarfes

- ▶ **BHKW's werden auch als Notstromaggregat eingesetzt**



Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) „Hot Module“ der MTU-Friedrichshafen

- ▶ Elektrolyt ist ein kristallines Lithium-Carbonat (Schmelzpunkt ca. 420°)
- ▶ Erdgas als Brennstoff mit interner Reformierung
- ▶ Betriebs-Temperatur: 650°C
- ▶ Elektrische Leistung: 250 kW
- ▶ Thermische Leistung: 180 kW
- ▶ El. Wirkungsgrad: ca. 47%



- ▶ **Krankenhäuser sind durch hohe Energieverbräuche sowie besondere Anforderungen an die Versorgungssicherheit für den Einsatz von Brennstoffzellen geradezu ideal geeignet.**

- ▶ **Elektrische Energie**
 - ▶ ~8 MWh pro Bett und Jahr
 - ▶ Krankenhäuser verbrauchen ca. 1% der gesamten elektrischen Energie in Deutschland



▶ Notstrom

- ▶ Dieselgeneratoren oder Blockheizkraftwerke
- ▶ Ca. 50% der Stromverbraucher werden versorgt
- ▶ Ausfallzeit max. 15 sec

▶ Unterbrechungsfreie Versorgung

- ▶ Operationsleuchten
- ▶ Lebenswichtige medizinische Geräte
- ▶ EDV-Server, medizinisch genutzte Arbeitsplätze (CT, MR, Herzkatheter-Anlagen)
- ▶ USV-Bedarf wird in den nächsten Jahr erheblich ansteigen. (digit. Patientenakte / Archiv etc.)



▶ Wärme:

- ▶ Kältemaschinen
- ▶ Heizung
- ▶ Warmwasser
- ▶ Bewegungsbecken
- ▶ Durchschnittlicher Verbrauch: 25 MWh pro Bett und Jahr

▶ Prozessdampf

- ▶ Sterilisatoren
- ▶ Instrumenten-Aufbereitung
- ▶ (Küchen)
- ▶ (Wäscherei)

▶ Kälte

▶ Klima-Anlagen für:

- ▶ Operationsräume
- ▶ Intensiv-Station
- ▶ EDV-Server-Räume

▶ Kaltwasser:

- ▶ Medizinische Großgeräte (NMR, CT, Zyclotron)



Wirkungsgrad:

▶ BHKW

- ▶ Elektrischer Wirkungsgrad ca. 33%
- ▶ Thermischer Wirkungsgrad ca. 55% (Anteile Hoch/Niedrig-Temperatur)
- ▶ Kein wirtschaftlicher Teillast-Betrieb möglich
- ▶ Durch fehlende Wärmeabnahme (Nachts/Sommer) muss die elektrische Erzeugung gedrosselt werden.

▶ Brennstoffzelle

- ▶ Elektrischer Wirkungsgrad: variabel, bis 50%
- ▶ Thermischer Wirkungsgrad: variabel (Hochtemperatur)
- ▶ Energieerzeugung kann dem aktuellen Energiebedarf angepasst werden
- ▶ Im Teillastbereich annähernd gleiche Wirkungsgrade



▶ Emissionsfreie Erzeugung

- ▶ Warme, wasserdampfhaltige Abluft (40°-60° in RK)
- ▶ CO₂-Emission durch höheren Wirkungsgrad erheblich geringer.
- ▶ Keine weiteren Schadstoffe wie NO_x, CO, SO_x (unter Nachweisgrenze)

Man spricht daher nicht von Abgas sondern Abluft

- ▶ -> BImSchG nicht erforderlich



▶ Geringere Wartungskosten

- ▶ wenig mechanische Komponenten (industrielle Standardbauteile)
- ▶ wenig bewegte Teile (Gebläse, Ventile etc.)

▶ Geringerer Schallschutz

- ▶ die eigentliche chemische Reaktion verläuft geräuschlos
- ▶ im Betrieb nur Lüftermotoren von Nebenaggregaten hörbar
- ▶ aktueller Messwert: 68 db(A)



▶ Stromqualität

- ▶ Elektronischer Wechselrichter (IGBT-Inverter)
- ▶ Hohe Stromgüte, daher für USV geeignet
- ▶ Inselbetrieb ist Teil des Versuchsprogrammes im 2. Abschnitt

▶ Wechselnde Gasqualitäten

- ▶ Wechselnde Methanzahlen erfordern bei Gasmotoren hohen technischen Aufwand
- ▶ Kein Einfluss auf die Brennstoffzelle
- ▶ Andere Gasarten möglich (Biogas, Klärgas etc.)
- ▶ Biogas für MCFC aufgrund des höheren CO₂-Gehalts prädestiniert



▶ Hohe Abwärmtemperatur

eröffnet eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten zur Wärmenutzung:

- ▶ Microturbinen zur Erzeugung zusätzlicher elektrischer Energie
- ▶ mehrstufige, hocheffektive Kältemaschinen (noch zu entwickeln)
- ▶ hier genutzt: Prozessdampf, Heizungswärme



**Standort:
Ehemaliges Sole-
Wellenbad**



Das Projekt





- ▶ **Einbringung**
 - ▶ **Media-Supply**

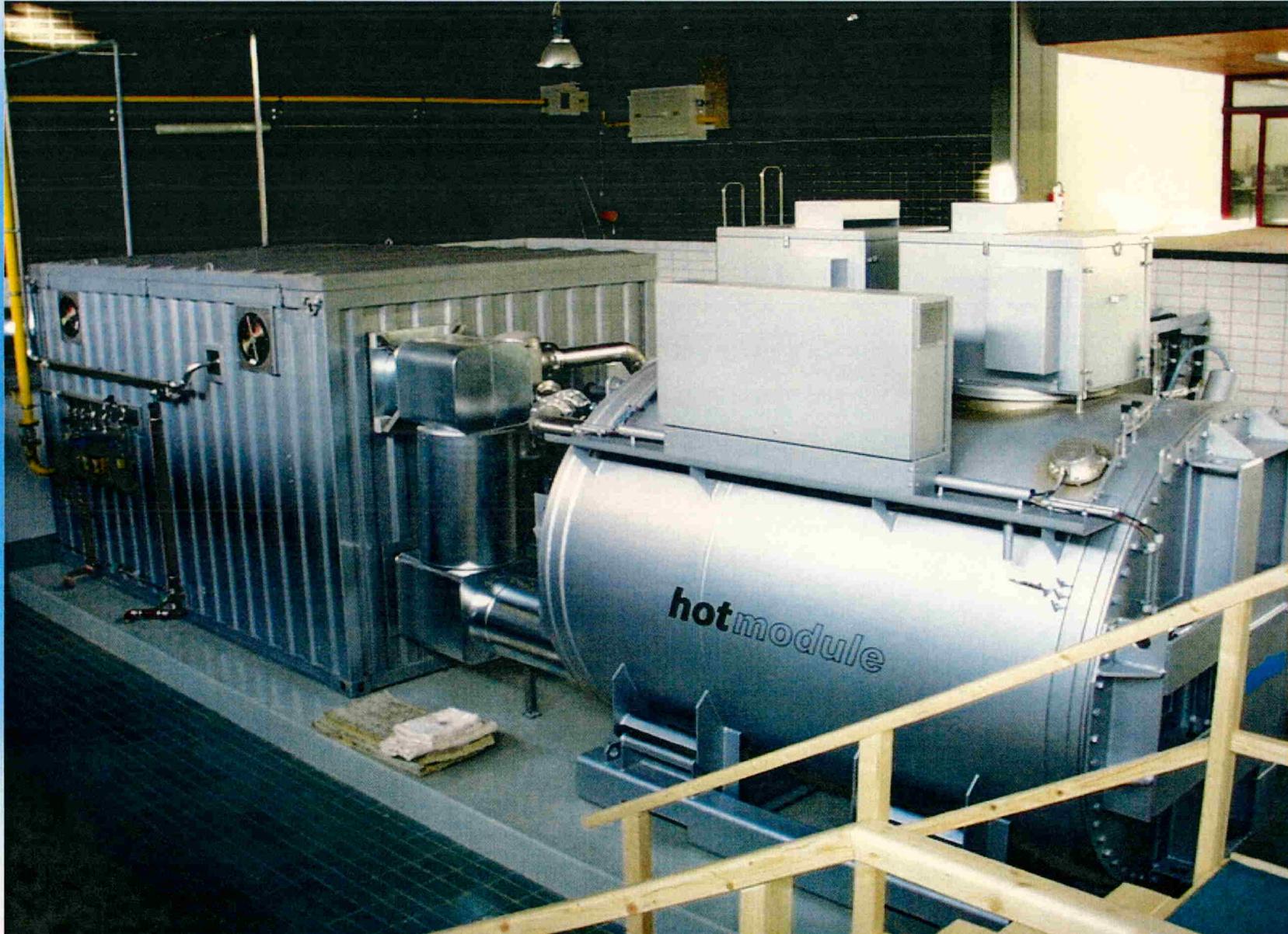




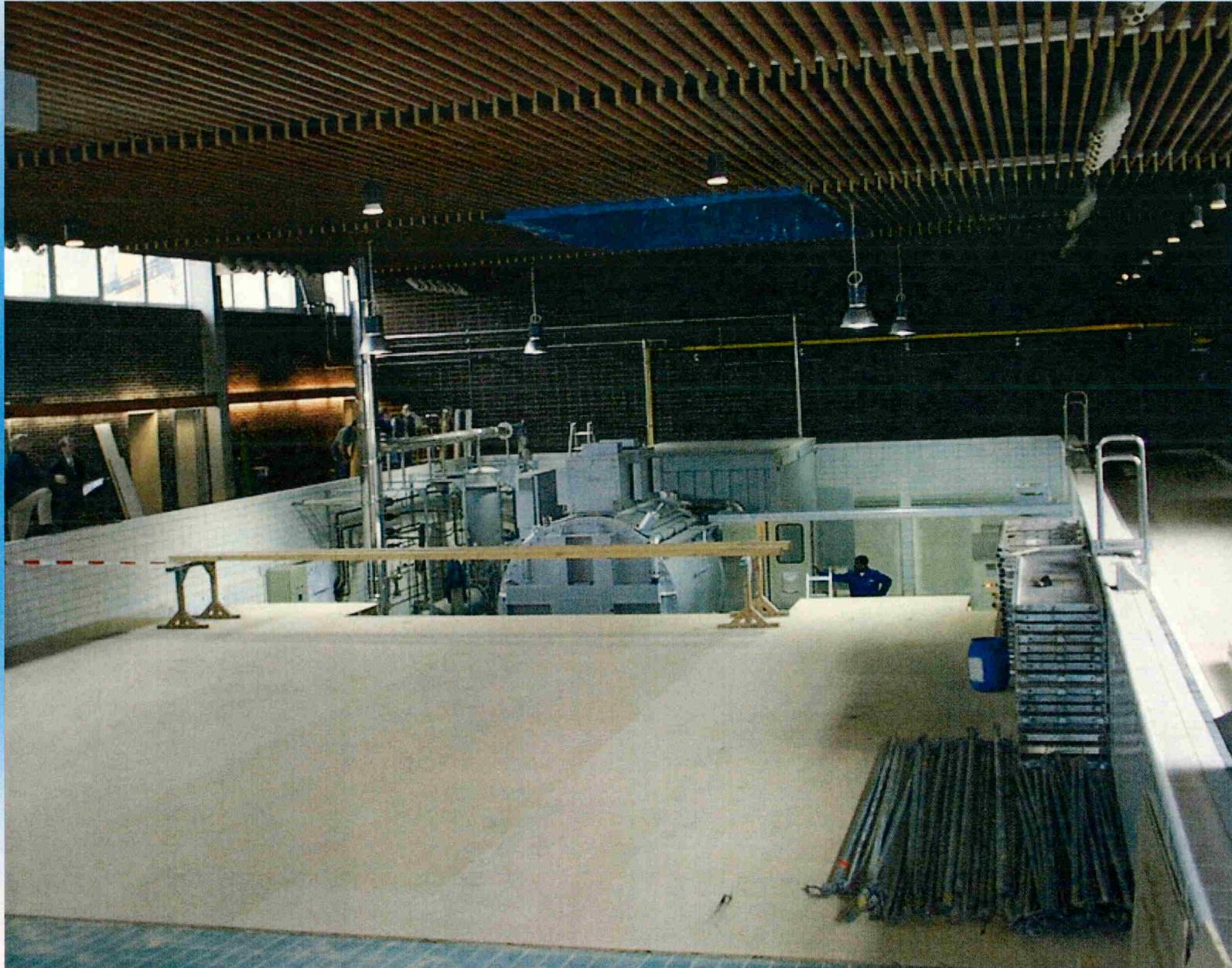
- ▶ Einbringung
- ▶ Hot Module



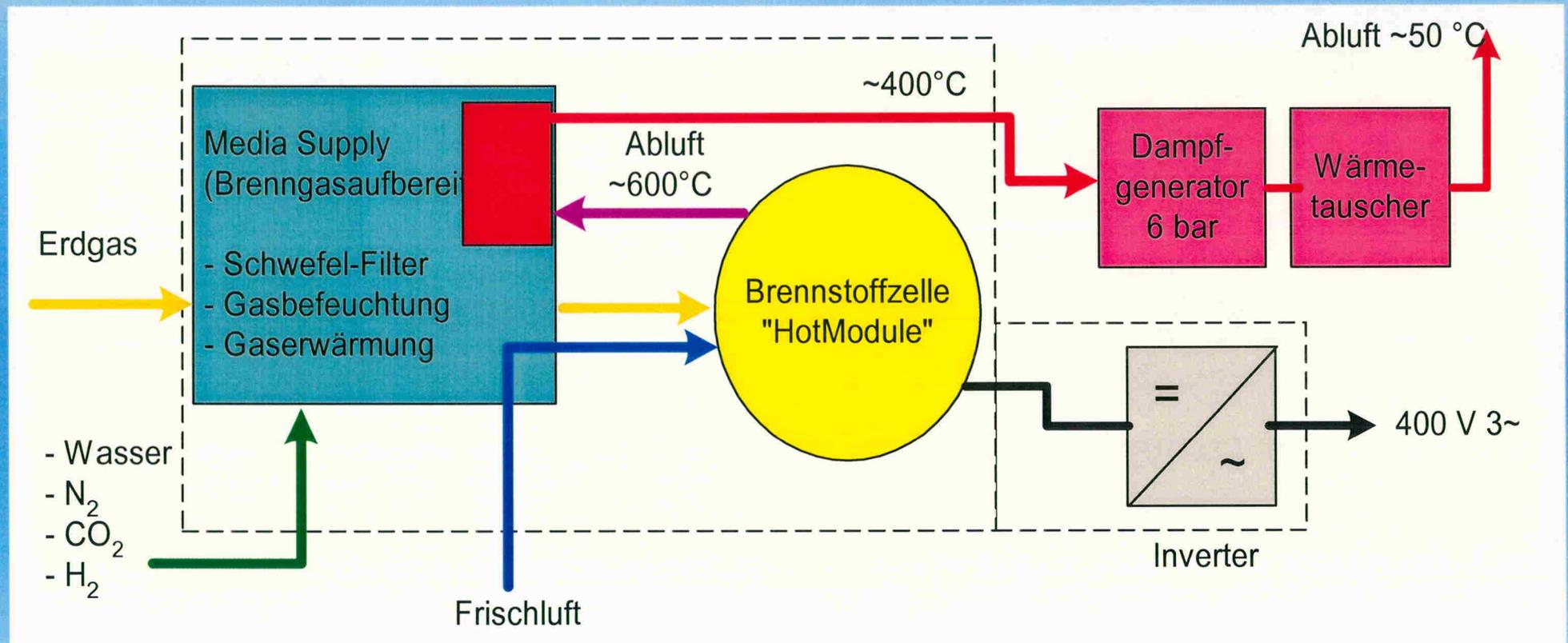
Das Projekt



Das Projekt



Einbindung in die vorhandene Infrastruktur





- ▶ **Elektrischer Anschluss: 250 kW Netz-parallel, Inselbetrieb**
- ▶ **Erdgasversorgung: 650 mbar**
- ▶ **Druckluft 6 bar (Pneumatisches System, Ventile etc.)**
- ▶ **Technische Gase (N_2 , CO_2 , H_2)**
- ▶ **Wasser / Abwasser**
- ▶ **Abluft:**
 - ▶ **~400 °C bis 200 °C Prozessdampf für Sterilisationengeräte (8 bar)**
 - ▶ **200 °C bis 40-60°C Brauchwarmwasser**
- ▶ **Anbindung an Gebäudeleittechnik**
 - ▶ **Anlagenüberwachung**
 - ▶ **Störmeldungen**

Abwärmennutzung



Abwärmennutzung

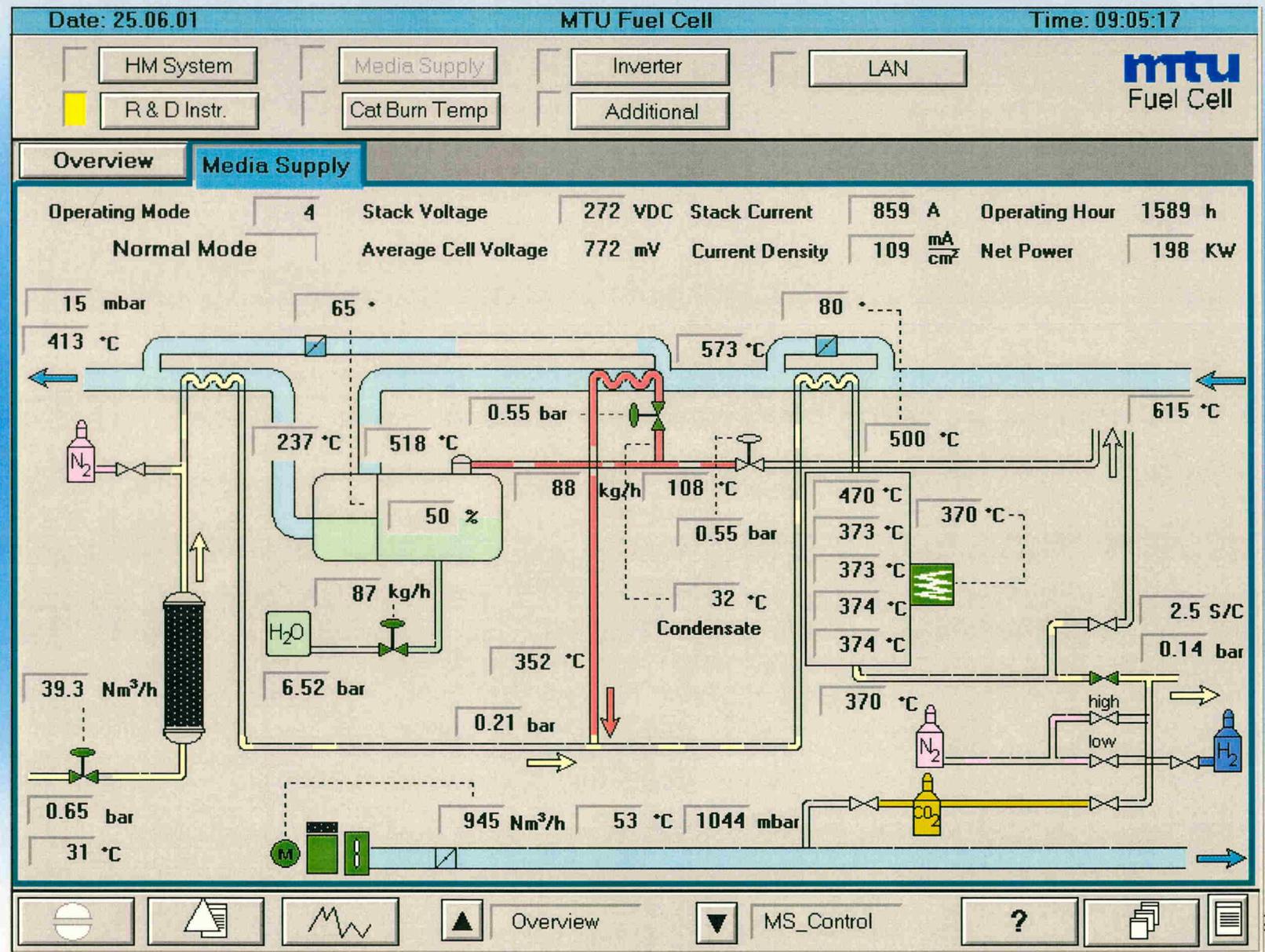


Media Supply (Brenngasaufbereitung)

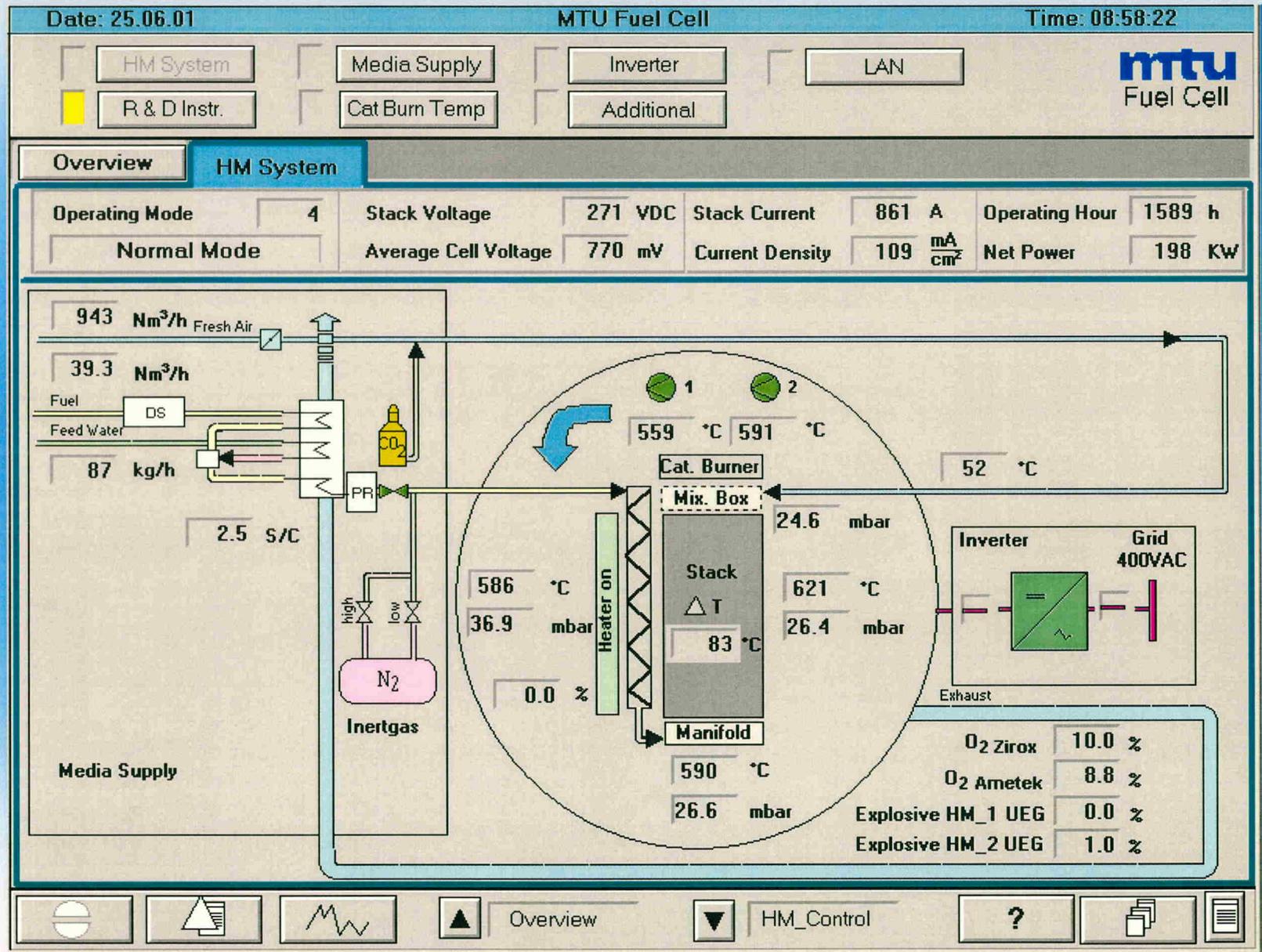




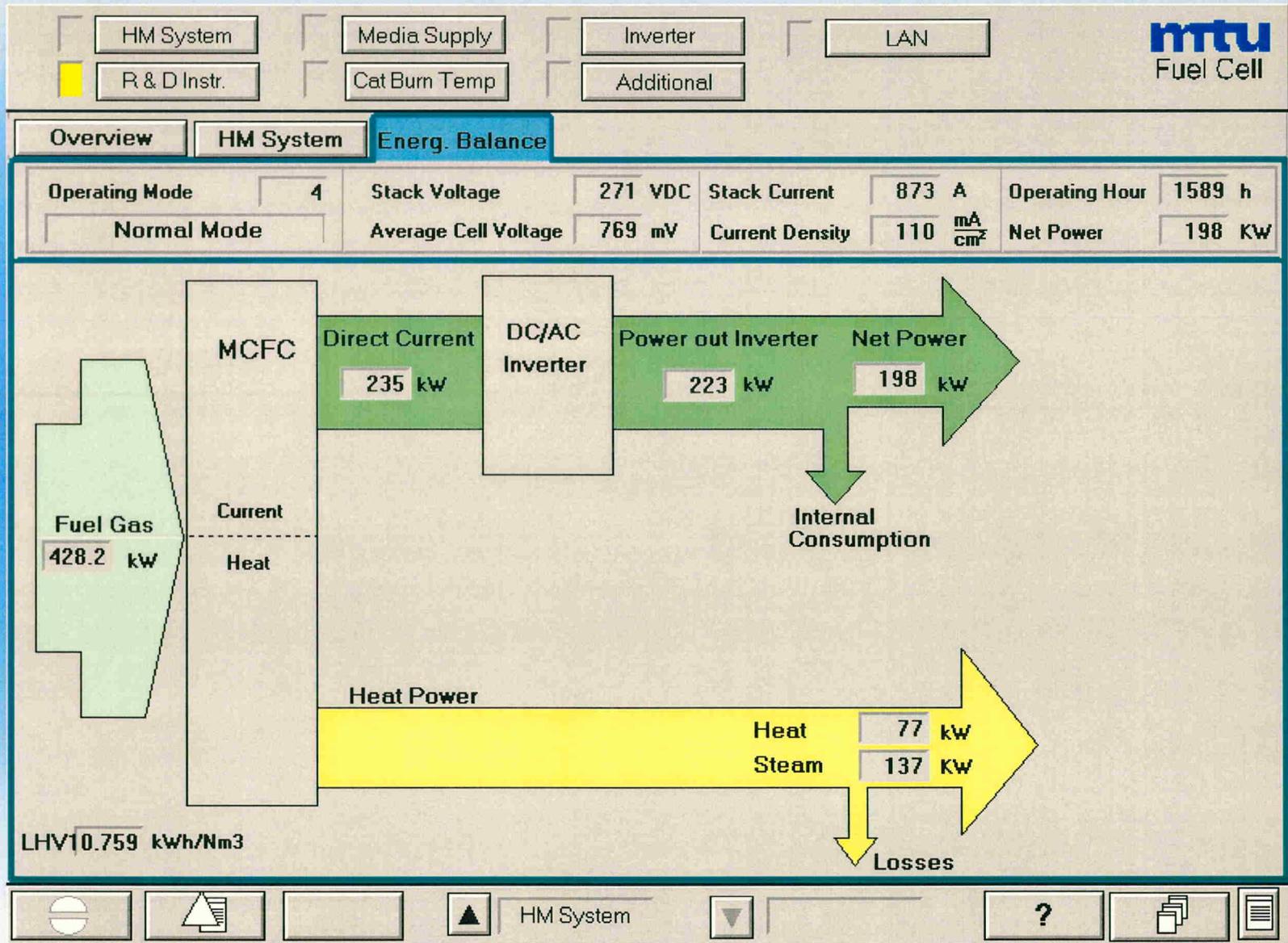
Media Supply Überblick



Hot module: Überblick



Energie Balance





▶ Verfügbarkeit:

- ▶ Seit Inbetriebnahme 23.04.01 4540 Betriebsstunden
- ▶ Anfängliche Probleme mit Wasseraufbereitung
- ▶ Seit Inbetriebnahme 4 nennenswerte Störungen:
 - ▶ 3 x Elektronik-Problem Wechselrichter: reduzierte Leistung für 3 – 9 Tage
 - ▶ Lagerschaden Gebläse:
Abkühlung des Hot Modules notwendig, Stillstand 2 Wochen

▶ Wirkungsgrad:

- ▶ thermischer Wirkungsgrad höher als erwartet:
gerechnet wurden 180kW, im Betrieb bei Teillast bereits 219kW erreicht
- ▶ Gesamtwirkungsgrad noch nicht ermittelbar, da messtechnische Änderungen notwendig
- ▶ Anlage deckt im Grundlastbereich ca. 20% der el. Energie am Standort



▶ Instandhaltung

- ▶ Tägliche Kontrolle ca. 1 Std.
- ▶ Vierteljährlicher Wechsel der Aktivkohlefilter des Media-Supply, Kalibrierung der Gaswarnanlage
- ▶ Kosten der Instandhaltung werden im wesentlichen von der Lebensdauer des Brennstoffzellenstapels abhängig sein



▶ Feldversuch:

- ▶ Revision des Zellstapels nach 1 Jahr im Werk
- ▶ Dynamisches Lastverhalten, Inselbetrieb

▶ Technologie

- ▶ Notstrom- bzw. USV-Bedarf eines Krankenhauses mit ca. 500 Betten könnte mit 3 Brennstoffzellen à 300 kW el. sichergestellt werden
 - ▶ Abdeckung des gesamten Strom- und Dampfbedarfs, sowie eines Teils des Wärmebedarfs
 - ▶ Einspeisung des Überschußstromes in das öffentliche Netz
 - ▶ zukünftige Förderung nach KWK-Gesetz: 5 Cent/kWh
- ▶ **RHÖN-KLINIKUM AG** als innovatives Unternehmen möchte umweltfreundliche Technologie weiterentwickeln und zum wirtschaftlichen Durchbruch verhelfen



Projektbeteiligte:

RHÖN-KLINIKUM AG



MTU Friedrichshafen



Freistaat Bayern



Ferngas Nordbayern GmbH



STRATO 2001

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in Mecklenburg-Vorpommern

- Neue Materialien für Niedertemperatur-Brennstoffzellen -

Ein Vortrag zum *Innovationsforum am 13. November 2001*
im Rahmen der „**STRATO 2001**“ in Rostock

angefertigt von: **Dipl.-Ing. Stephan Möller**
Maschinenbau / Energietechnik

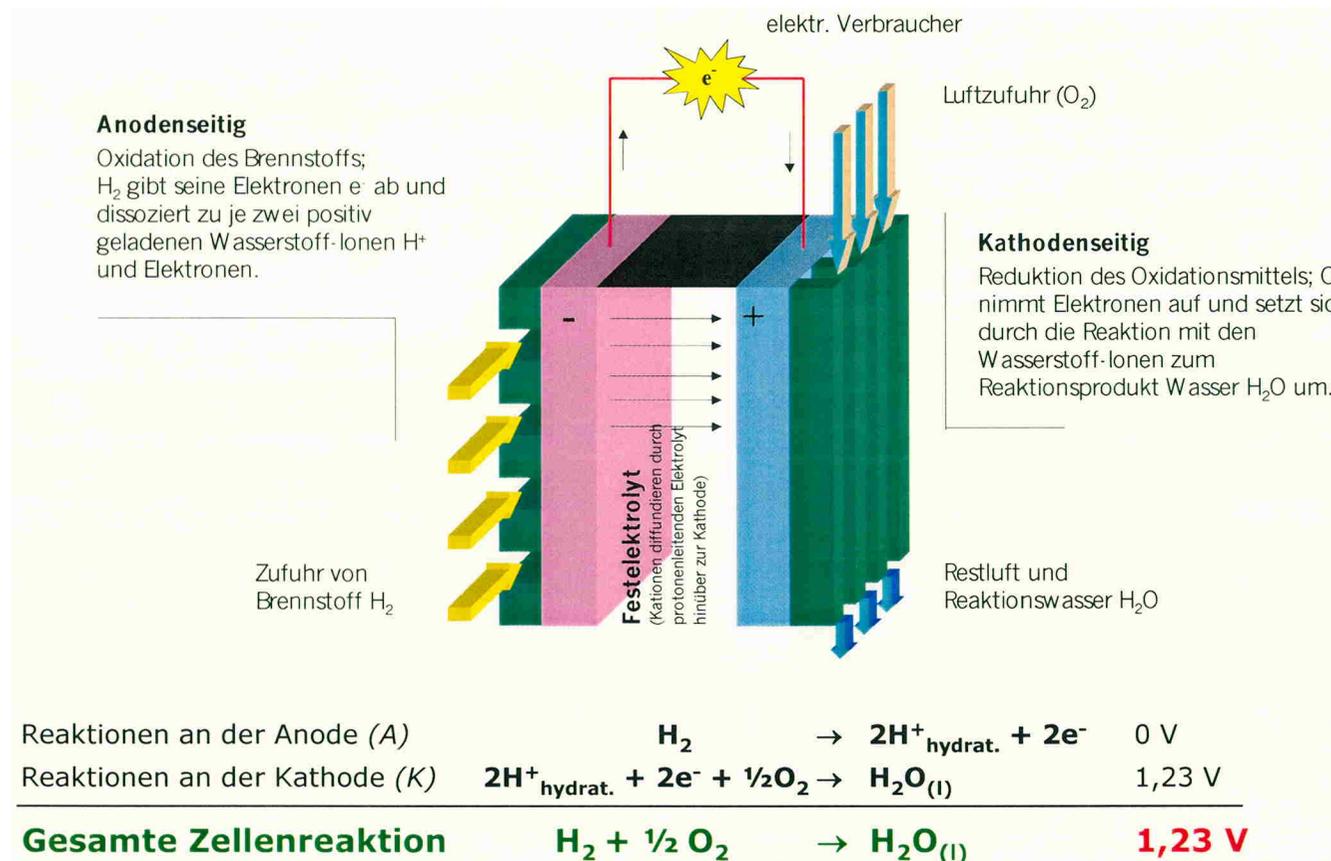
in Zusammenarbeit mit dem
**Institut für Oberflächen- und
Dünnschichttechnik IfOD**
der Hochschule Wismar

Dipl.-Ing. S. Möller / advanced energy-systems
balticblue@gmx.de

Dr. rer.nat. M. Wienecke / **IfOD**
m.wienecke@et.hs-wismar.de



die pem-brennstoffzelle



der inhalt



die pem-brennstoffzelle



tragende komponenten der pem-bz

- interkonnektor
- gasdiffusionsschicht
- membrane-electrode-assembly



elektrisch leitfähige polymere

- cnt-gefüllte polymere



innovative fertigungsmöglichkeiten



auswertung und ausblick



tragende komponenten



interkonnektor

- gasverteilung
- elektrische kontaktierung
- kühlsegment



gasdiffusionsschicht

- „diffusionsgewebe“
- kontaktierungshilfe
- schutz der mea

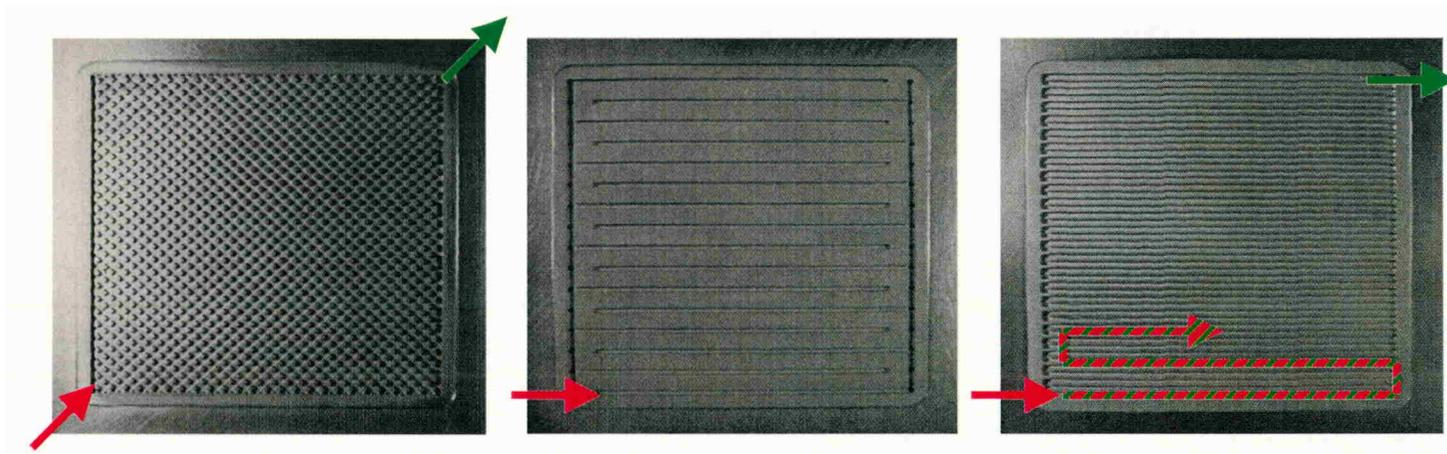


membrane-electrode-assembly

- reaktionszone
- gastrennung
- elektrodenträger



interkonnektor



Abbildungen:

Verschiedene Gasleitstrukturen eines Interkonnektors im Vergleich
(v. L. n. R.):

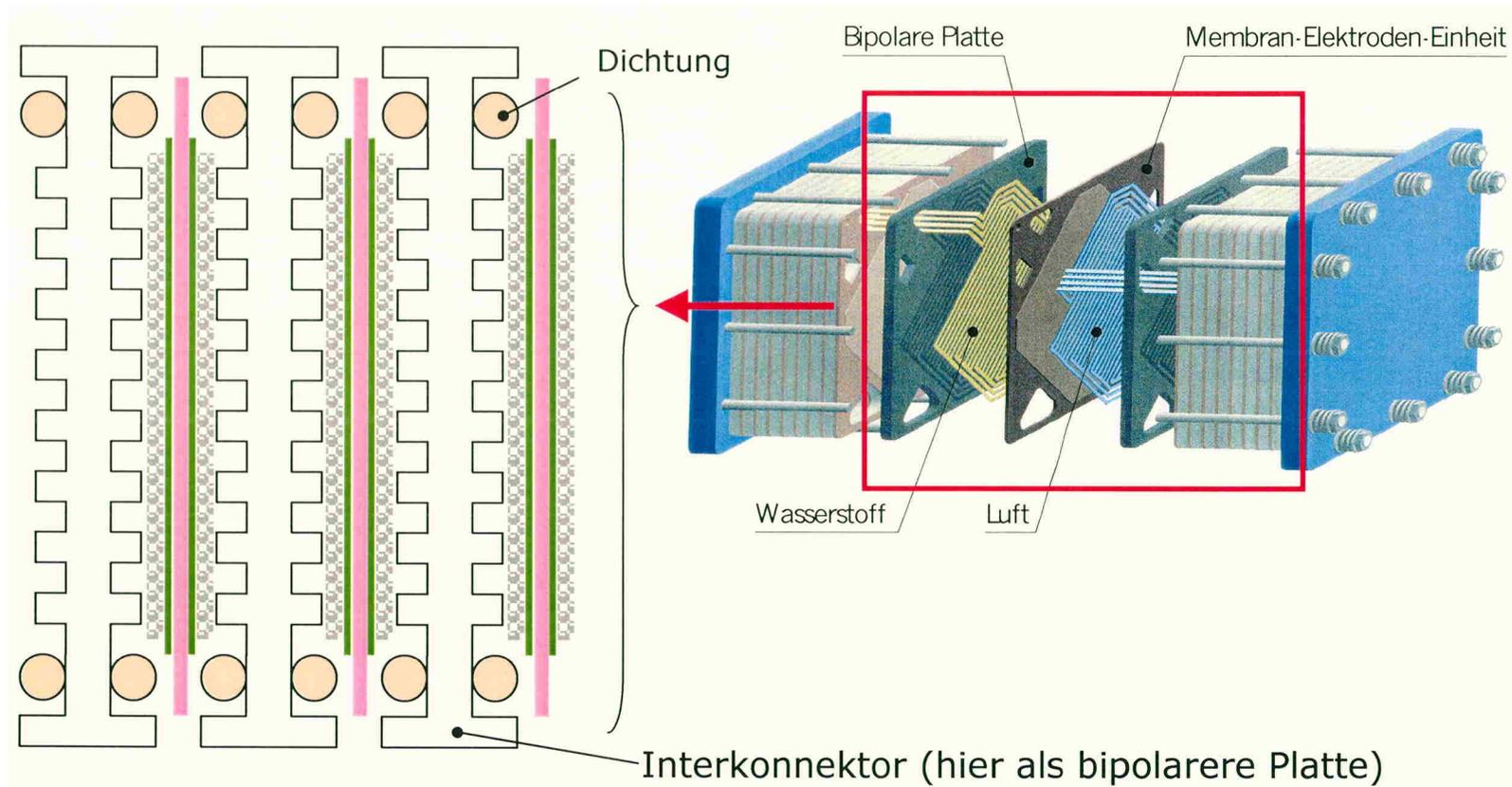
- 45° Füßchenstruktur
- DEAD-End Kanal (vollständiger Verbrauch der Reaktionsgase)
- Mäander-Kanal


Gaseinlaß

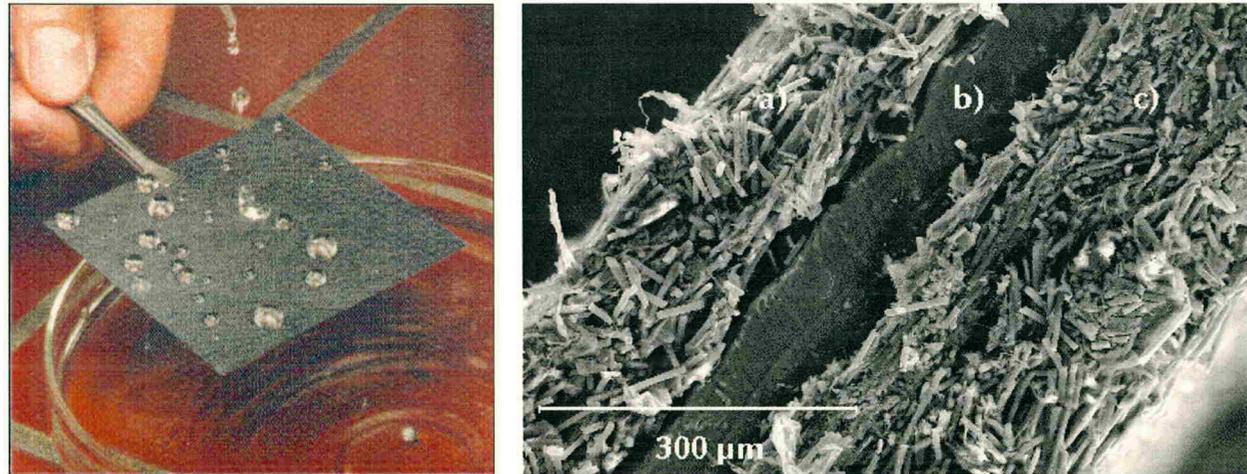

Gasauslaß



interkonnektor



gasdiffusionsschicht



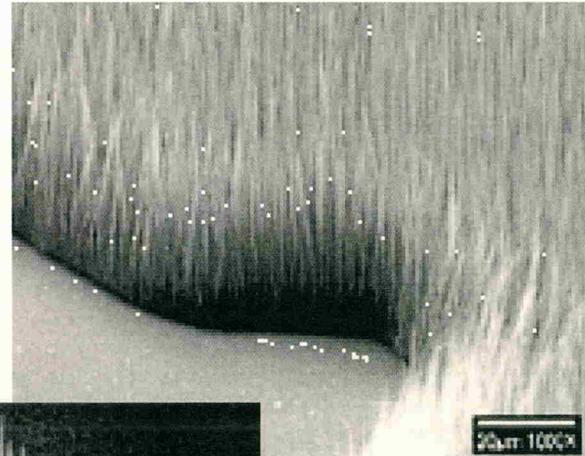
Abbildungen: links -> Effekt eines hydrophobierten Kohlepapiers

rechts -> REM-Aufnahme von: (a) 170 µm Kohlepapier
(b) MEA
(c) 260 µm Kohlepapier

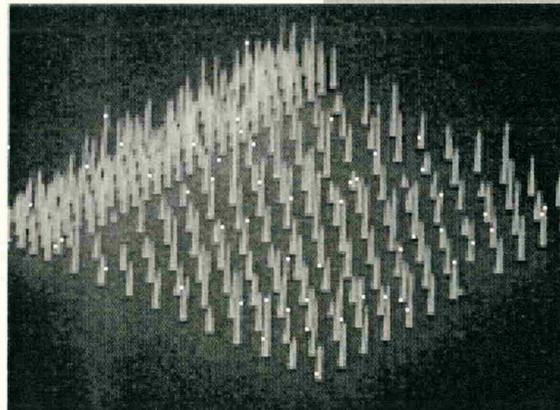


membrane-electrode-assembly

„large surface area electrodes“ durch
gezieltes Wachstum von Carbon
Nanotubes als „**Nanorasen**“...



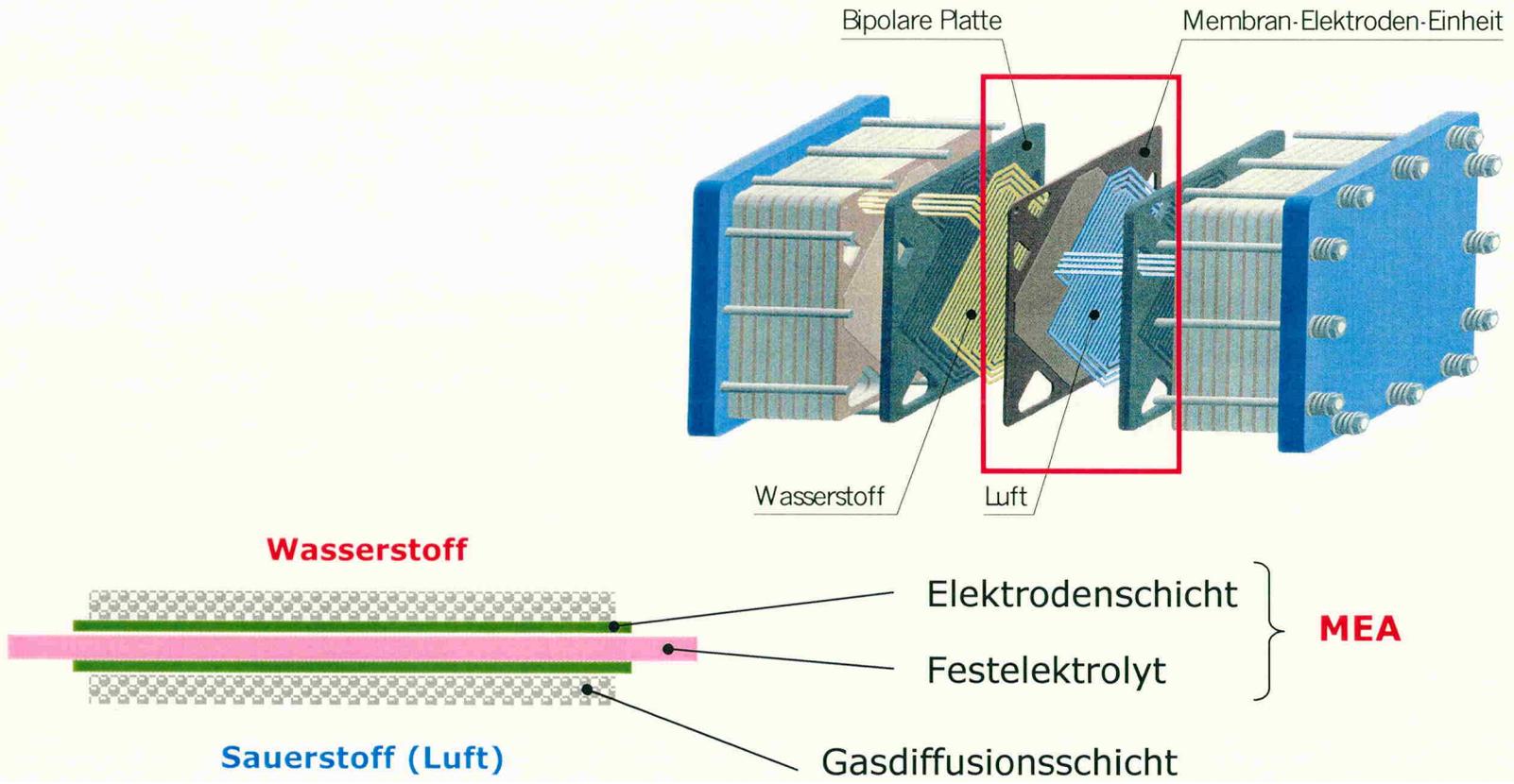
...auf Glas



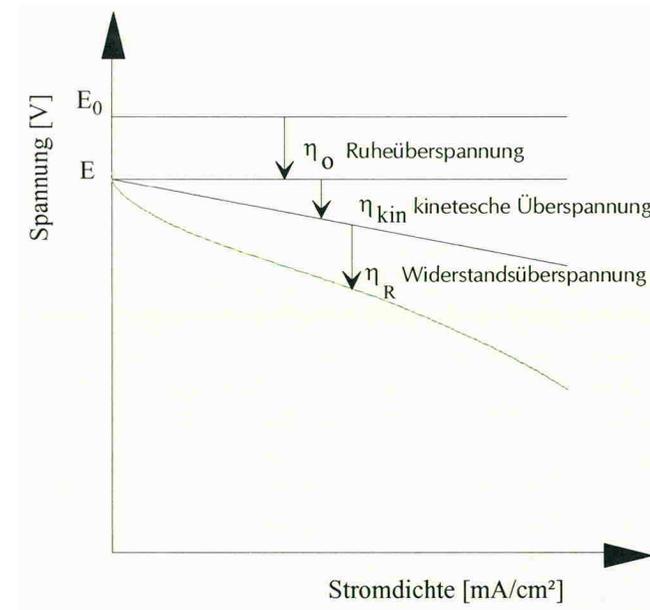
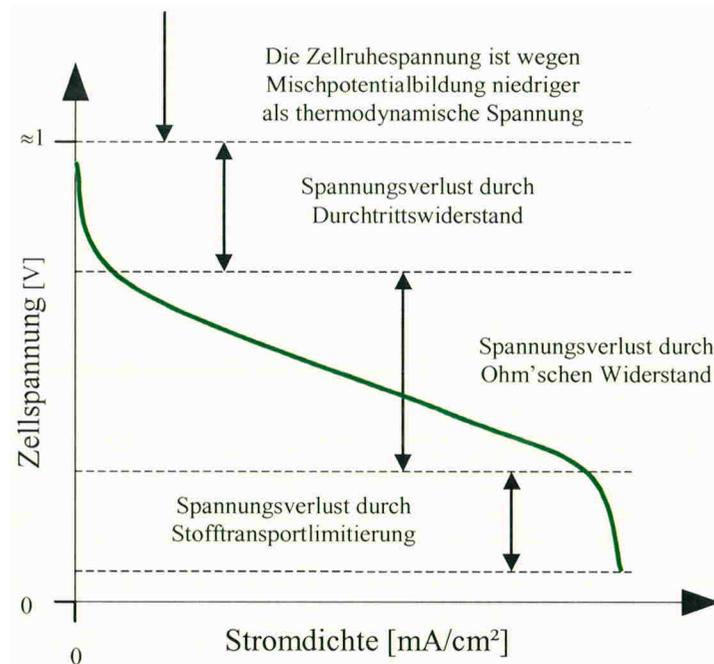
...auf Silizium



membrane-electrode-assembly



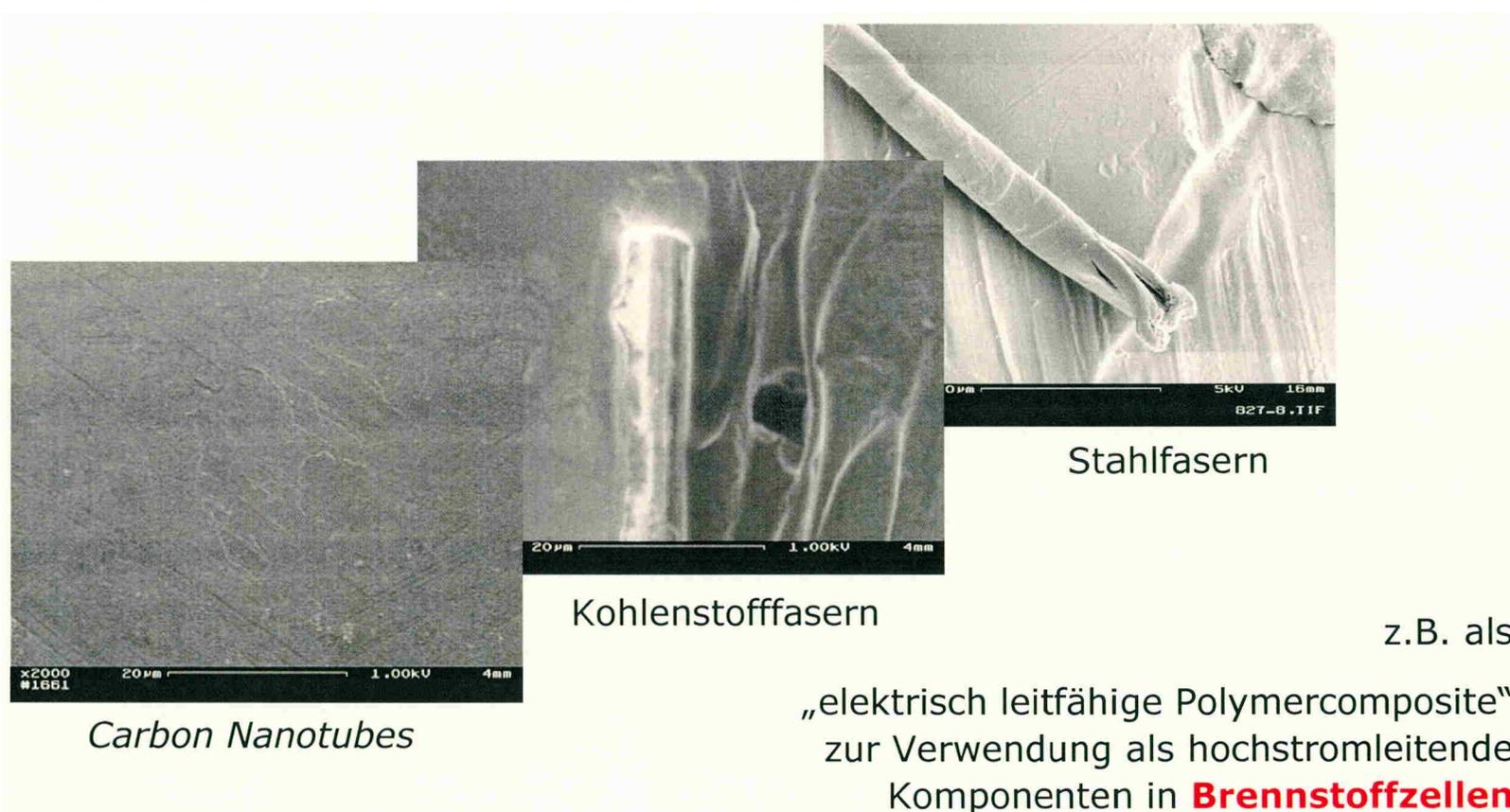
technisch reale betriebsweise



Abbildungen: Reale Charakteristik einer PEM-Brennstoffzelle mit ihren Überspannungen bzw. Spannungsverlusten



innovative füllstoffsysteme



carbon nanotubes (cnt)

... cnt's sind eindimensionale metalle

TEM-Aufnahmen von CNT's:

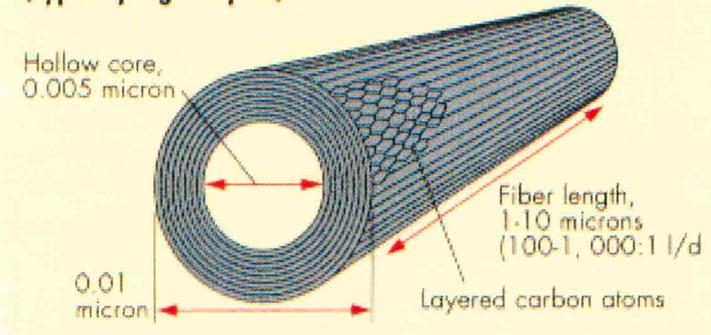
as grown



fishbone structure



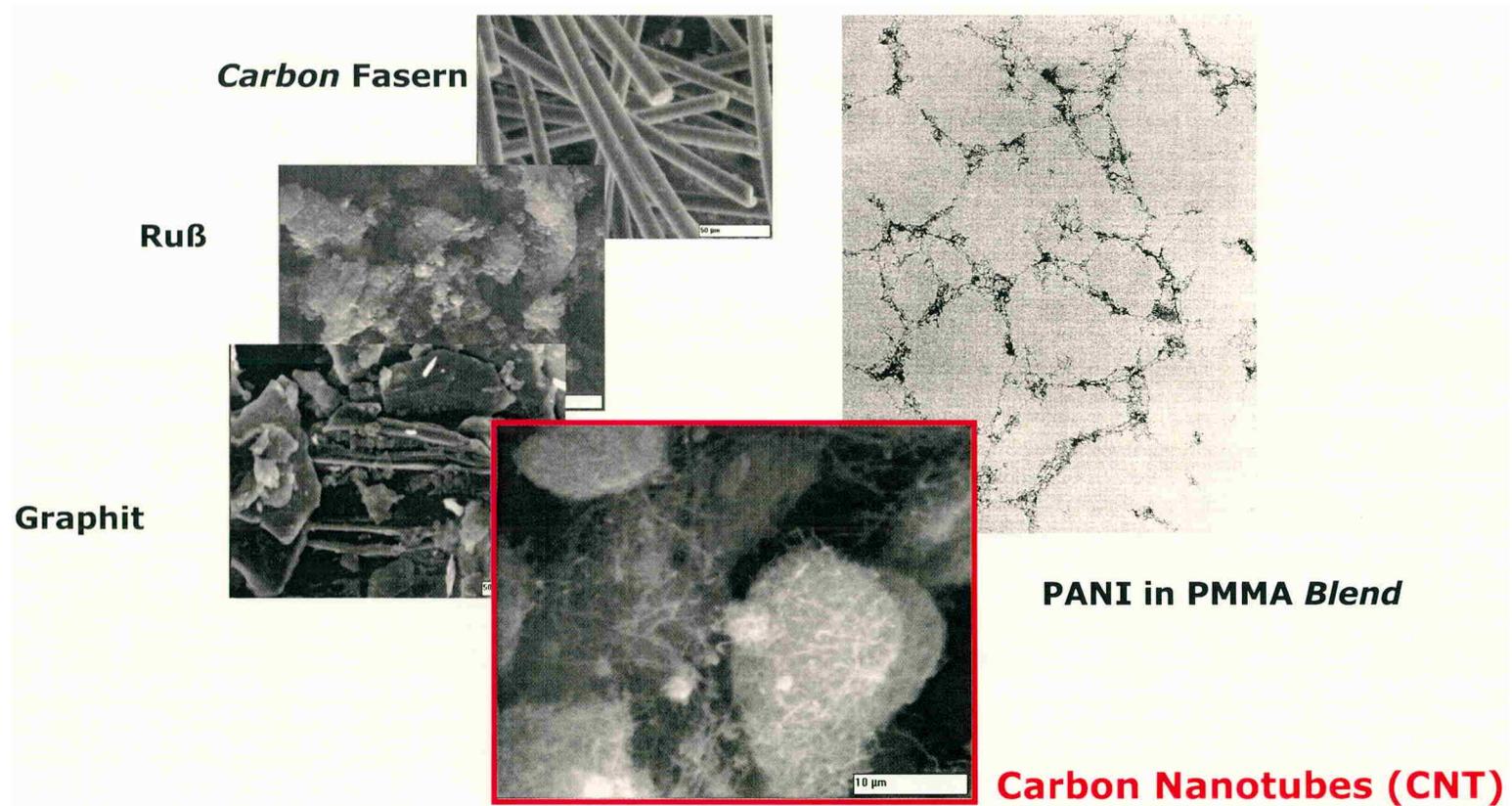
Rolled-up graphite sheets
(typically eight layers)



...spez. elektrische Leitfähigkeit: **$1,8 \cdot 10^4 \text{ S/cm}$**
(für Anwendungsfelder als Komponenten in
Brennstoffzellen werden ca. 100 S/cm benötigt)

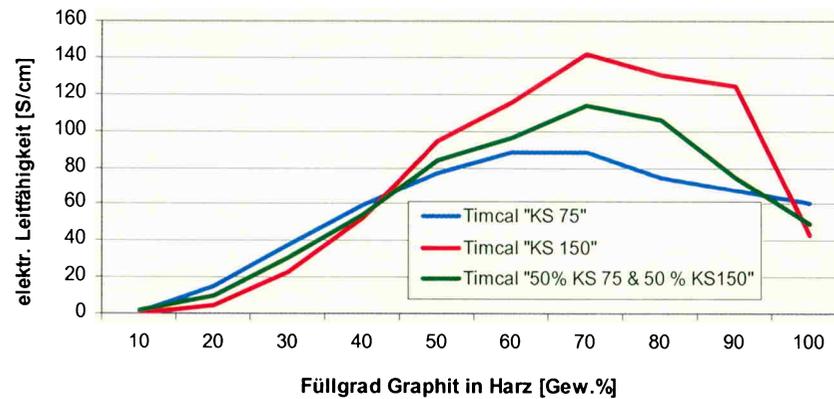


elektrisch leitfähige polymere

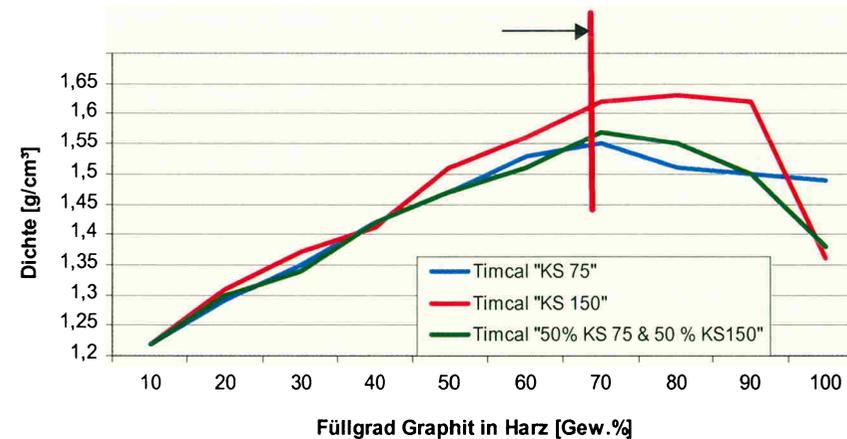


elektrisch leitfähige polymere

elektr. Leitfähigkeiten "Naturgraphit"



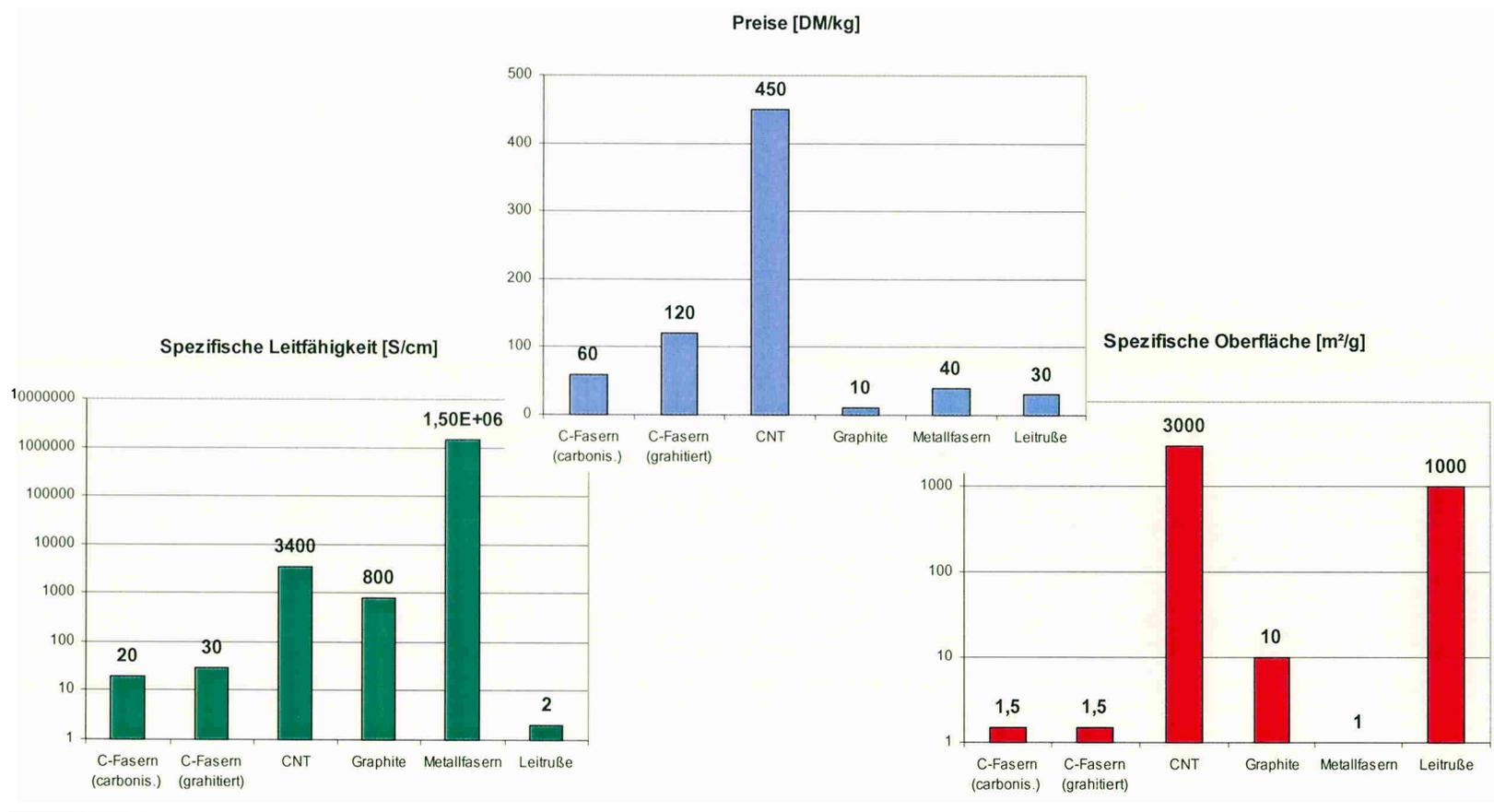
spez. Dichte der Presslinge "Naturgraphit"



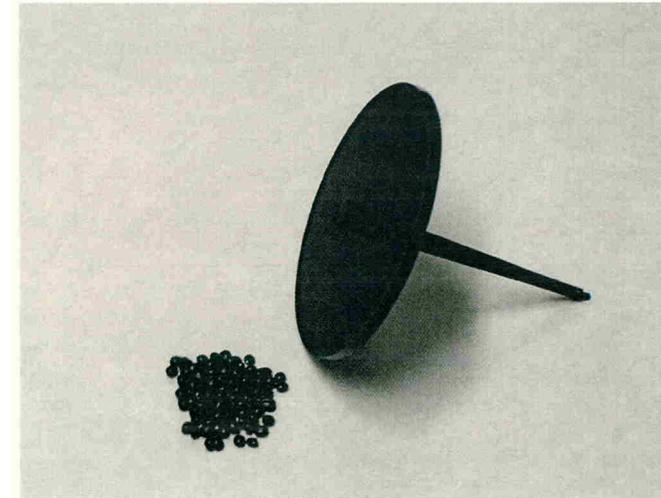
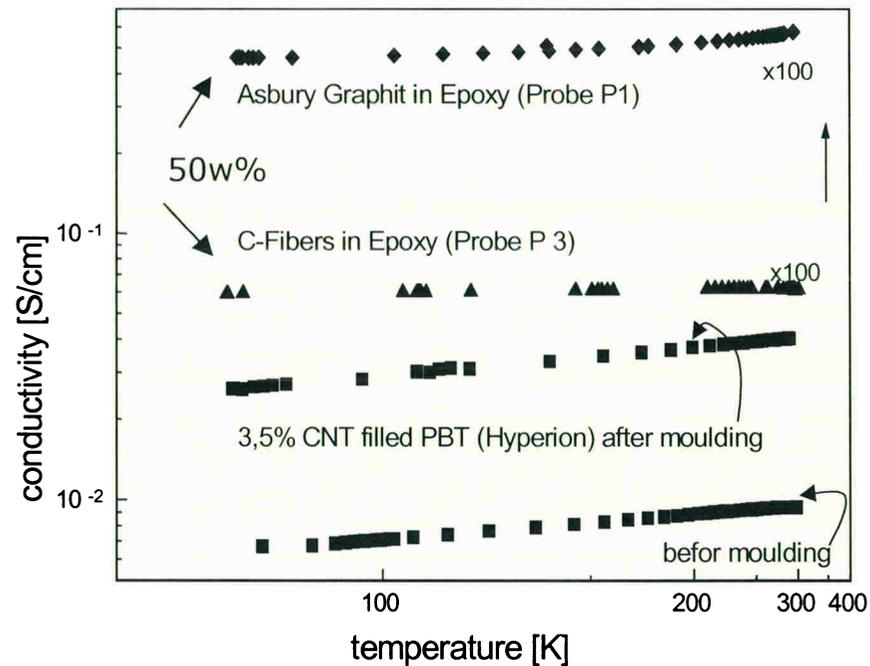
Abbildungen: Messungen zur spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von graphitgefüllten Polymercompositen in Abhängigkeit von der spez. Dichte und der Massenkonzentration



elektrisch leitfähige polymere



cnt-gefüllte polymere

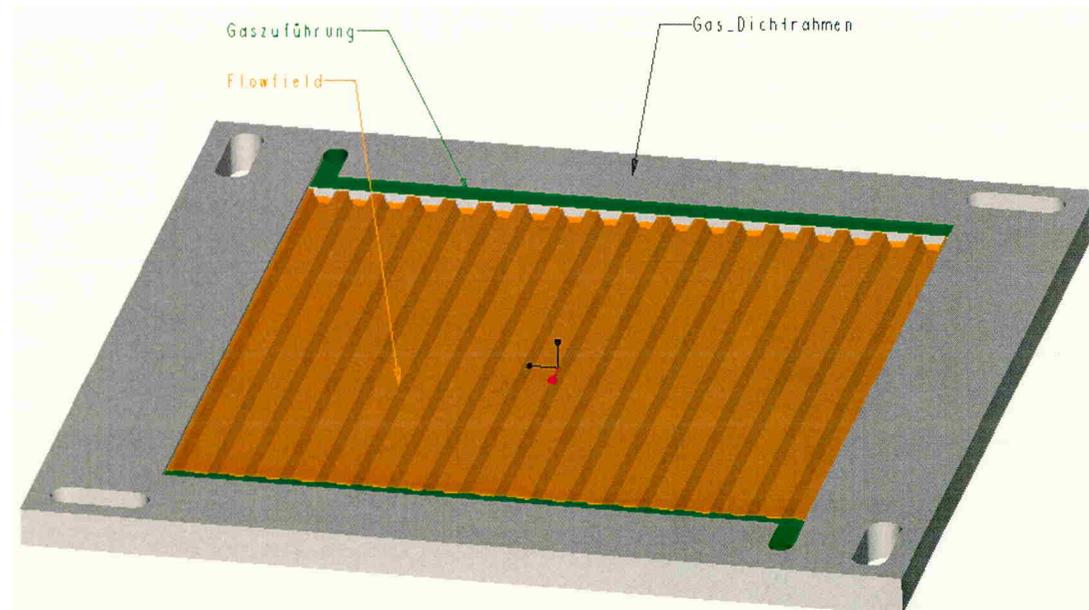


Leitfähigkeiten:

- EMI: > 1 S/cm
- ESD: $10^{-10} \dots 10^{-5}$ S/cm
- metallische Leitfähigkeit: $> 10^2$ S/cm



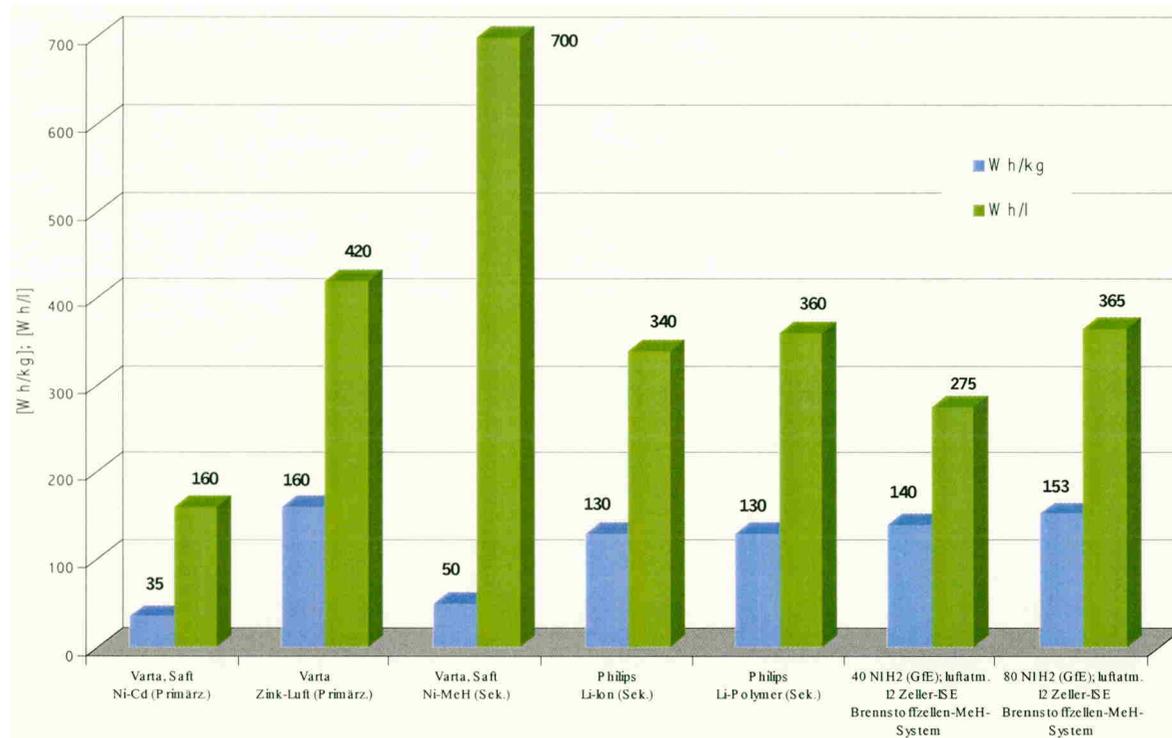
innovative fertigungsmethoden



- Abbildung: Modular aufgebauter Interkonnektor in Form einer Bipolarplatte (BPP)
- Dichtrahmen mit gleichzeitiger Gaszuführung und -verteilung
 - Innenliegender stromleitender Bereich.



chemische energiespeicherung



*Abbildung: Vergleich der Energiedichten verschiedener galvanischer Zellen/
Quellen: Int. Tagung „Batteries 2000 - Paris“; Fraunhofer ISE 2000*



vorteile von bz-systemen

- ⇒ modularer Aufbau
- ⇒ hohe Wirkungsgrade
- ⇒ unabhängige Dimensionierung
 - von Energiewandler (Leistung)
 - und Energiespeicher (Kapazität)
- ⇒ variable Geometrie
- ⇒ keine Selbstentladung
- ⇒ umweltfreundlichkeit
- ⇒ hohes Potential für kostengünstige Produktion



brennstoffzellenarten

| Typen & Arten (BSZ) | Brenngas / Oxidant | Temp.-bereich | Elektrolyt | Elektrischer Wirkungsgrad | Größe | Anwendungen (derzeit / künftig) |
|---------------------------------------|---|-------------------|--|---|--------------------|---|
| Alkalische-BZ - AFC - | reinst H ₂ , reinst O ₂ | 70-85 [°C] | 30% Kalilauge | Zelle: 60–70% System: 62% | 1 kW – 50 kW | Mobil: Apollo, Space Shuttle, U-Boot, Militärtechnik, etc. |
| Polymermembr.-BZ - PEM - | H ₂ , O ₂ , Luft | 50-100 [°C] | protonen- leitende Membran | Zelle: 50–70% System: 43– 58% | <1W – 500 kW | Stationär: häusl. Strom- / Wärmeerz. Mobil: PKW, Busse, Schienenverkehr, portable Geräte, Rehathechnik, maritime Energieversorgung, etc. |
| Direktmethanol- BZ - DMFC - | MeOH, Luft, O ₂ | 50–100 [°C] | protonenlt. Membran | Zelle: 20–30% | <1W – 500 kW | Mobil: Fahrzeuge portable Geräte (Zukunft) |
| Phosphorsaure- BZ - PAFC - | Erdgas, Biogas, H ₂ , O ₂ , Luft | 160 – 220 [°C] | konzentr. Phosphor- säure | Zelle: 55% System: 40% | bis 11MW | Stationär: Strom- / Wärmeerzeugung Mobil: Schienenverkehr |
| Karbonat- schmelzen-BZ - MCFC - | Erdgas, Biogas, (H ₂) , O ₂ , Luft | 620 – 660 [°C] | Salzschm. aus Alkali- karbonaten | Erdgas: Zelle: 65% System: 55-60% | 200 kW – 500 kW | Stationär: BHKW, kombinierte Strom- u. Dampfproduktion (Hot Module) |
| Oxidkeramische-BZ - SOFC - | Erdgas, Biogas, (H ₂) O ₂ , Luft | 800-1000 [°C] | Yttriumdot. Zirkonoxid (Keramik) | Erdgas: Zelle: 60–65% System: 55% | 2 kW – 1 MW | Stationär: Strom- / Wärmeerz., EVU, BHKW's (Sulzer Hexis, etc.) |



galvanische „energie-zellen“

Verschiedenste Möglichkeiten der elektrochemischen Energiespeicherung:

Primäre Zellen

Alkalische Monozelle (Batterie)

- Reaktionsstoffe werden vollständig verbraucht

Sekundäre Zellen

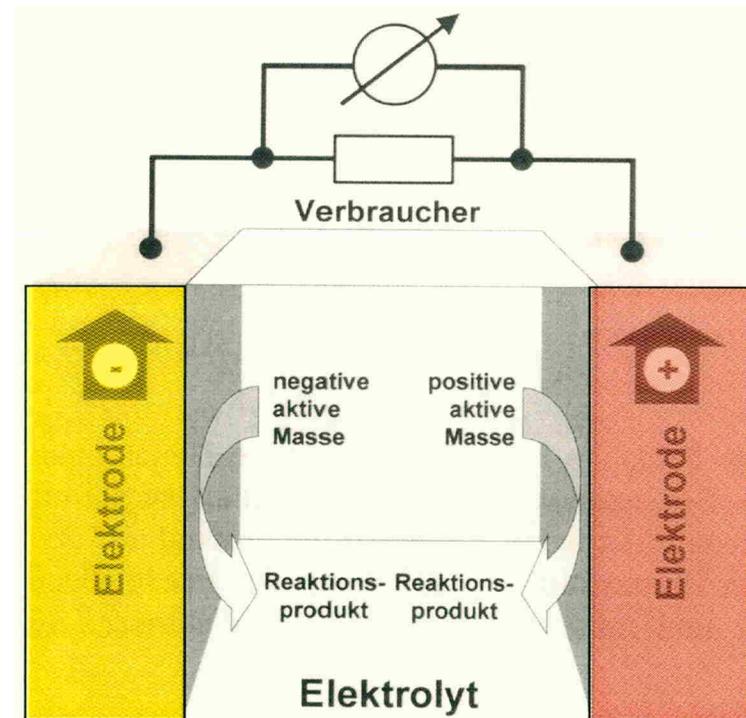
Akkumulatoren

- Nach Entladung wiederaufladbar

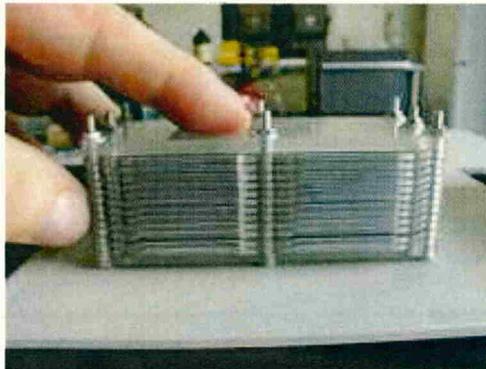
Tertiäre Zellen

Brennstoffzellen

- Reaktanden (Wasserstoff und Sauerstoff) werden kontinuierlich zugeführt

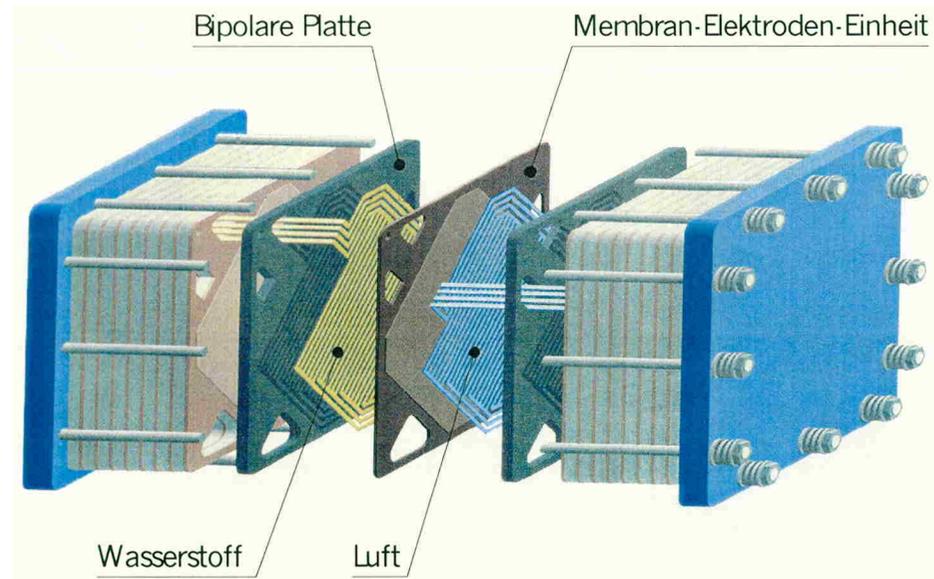


die „stack-bauweise“



Abbildungen: Gestapelte Bauweise zur Erhöhung der Ausgangsspannung

Oben: Laborzelle am Fraunhofer ISE;
Rechts: Stackbauweise von *Ballard Power Systems / Canada*



die „luftbeatmung“

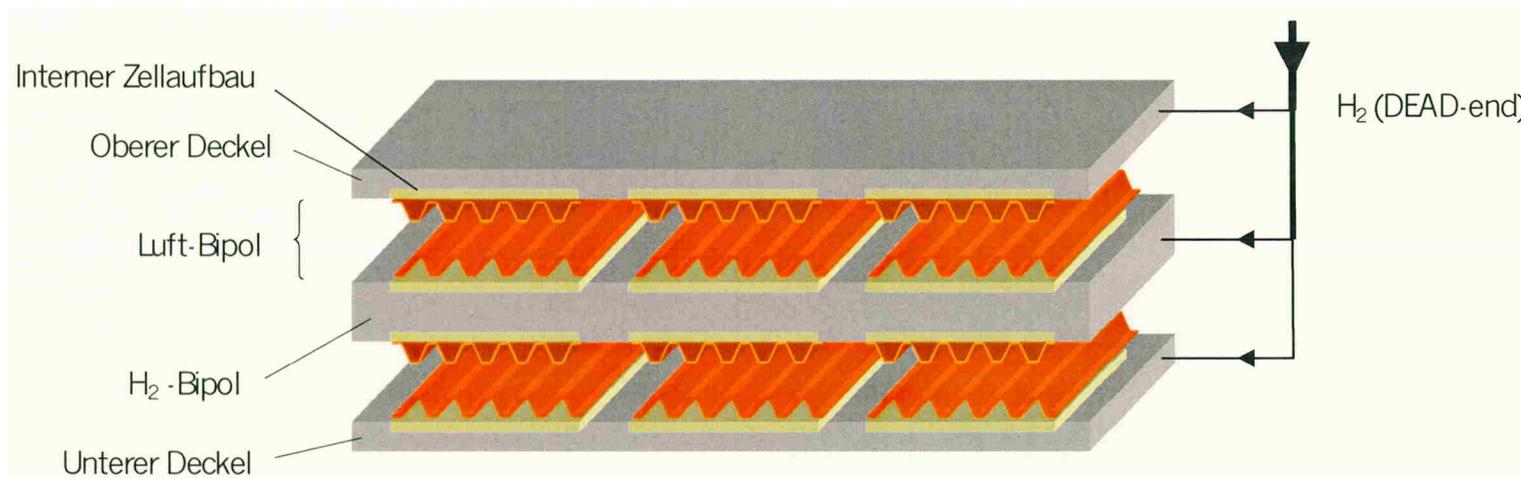


Abbildung: Querschnitt durch den konzeptionellen Vorentwurf eines luftbetriebenen 12-Zellers in planarer Bauweise. Die angedeuteten „Feinwellbleche“ stellen hier die anodenseitige Luftleitstrukturen (Flow-Field's) dar.



der funktionsprototyp



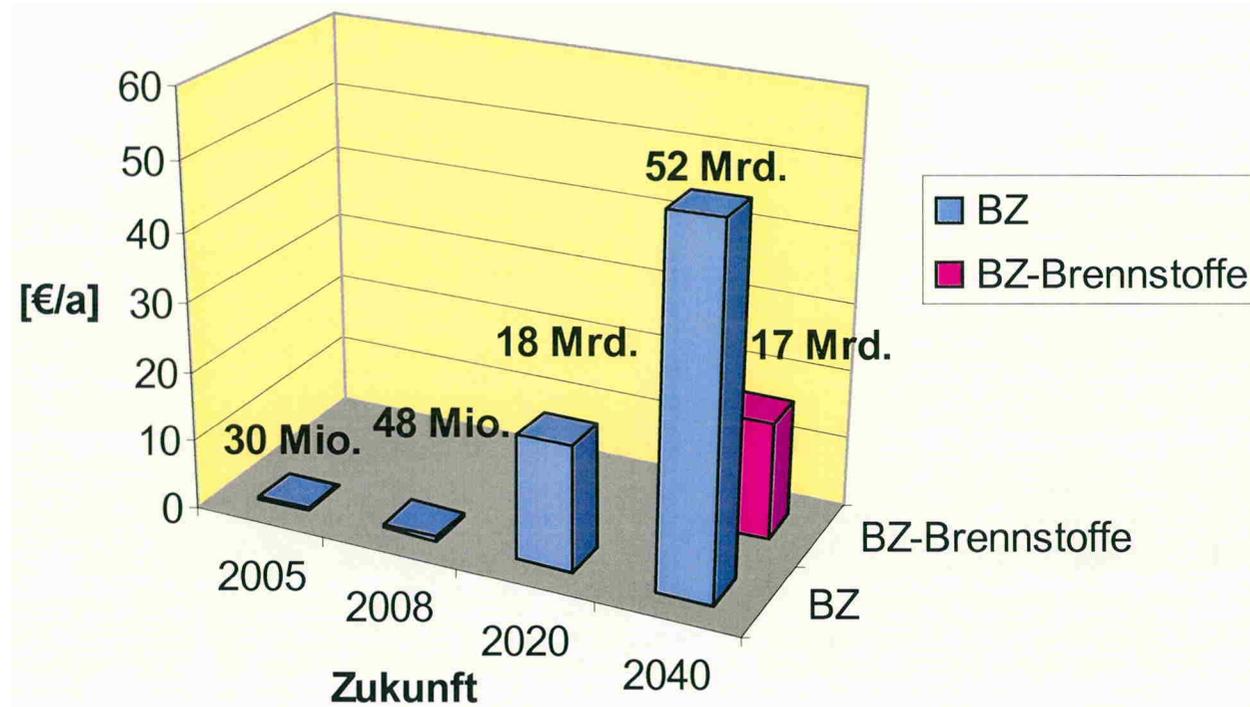
Abbildung: Schwierigkeiten einer externe Verschaltung und Gasversorgung der einzelnen Zellen

- Zelle: **12-Zeller** mit 6,3 Watt; luftbeatmet; polymeres Grundchassis; modulare Bauart
- Maße: T x B x H --> **60 x 78 x 15 mm**



„rosige zeiten“

- Rosige Zeiten für Brennstoffzellen-Hersteller -
"Frost&Sullivan; October 2001"





Projektträger für das Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern Förderprogramme von der Idee bis zum Markt

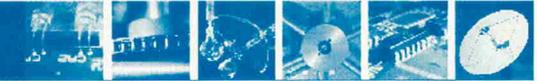
Absatz- und Exporthilfe ————— Markt

Qualitätsmanagement/
Akkreditierungen — Qualitätssicherung

Technologie- und
Innovationsförderung — Entwicklung

Patent- und Lizenzfonds — Idee
Mecklenburg-Vorpommern



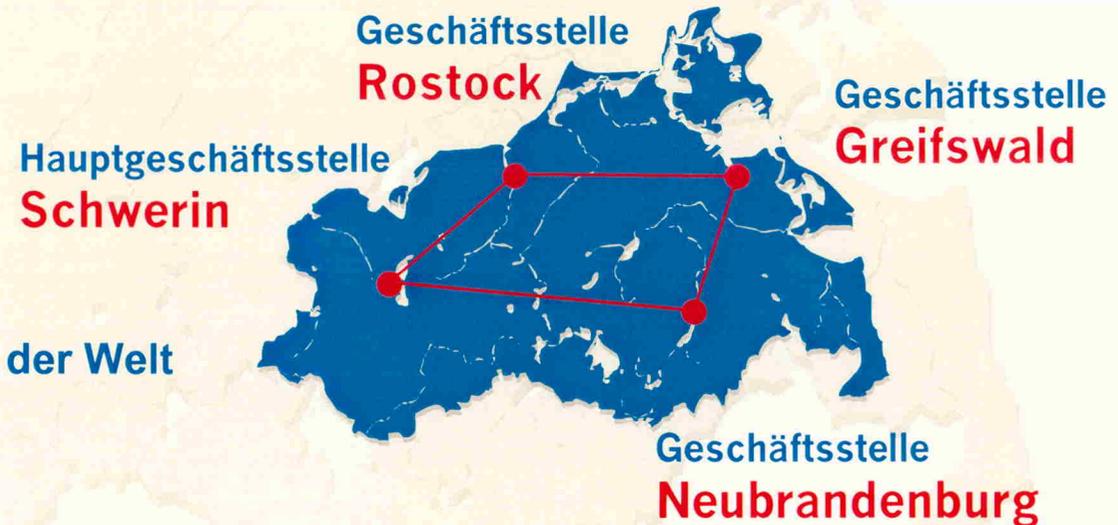


Diplomingenieure der Fachbereiche :

- Elektronik/ Elektrotechnik
- Informatik
- Biologie
- Chemie
- Maschinenbau
- Schiffbau
- Schweißtechnik
- Lebensmitteltechnologie
- Betriebswirtschaft
- Wirtschaftsrecht
- Patentassessor

Zugang zu relevanten Onlineinformationsanbietern der Welt

- STN Karlsruhe, GBI München
- FIZ Technik - Frankfurt a.M.
- *DEPATIS* - Patentinformationen



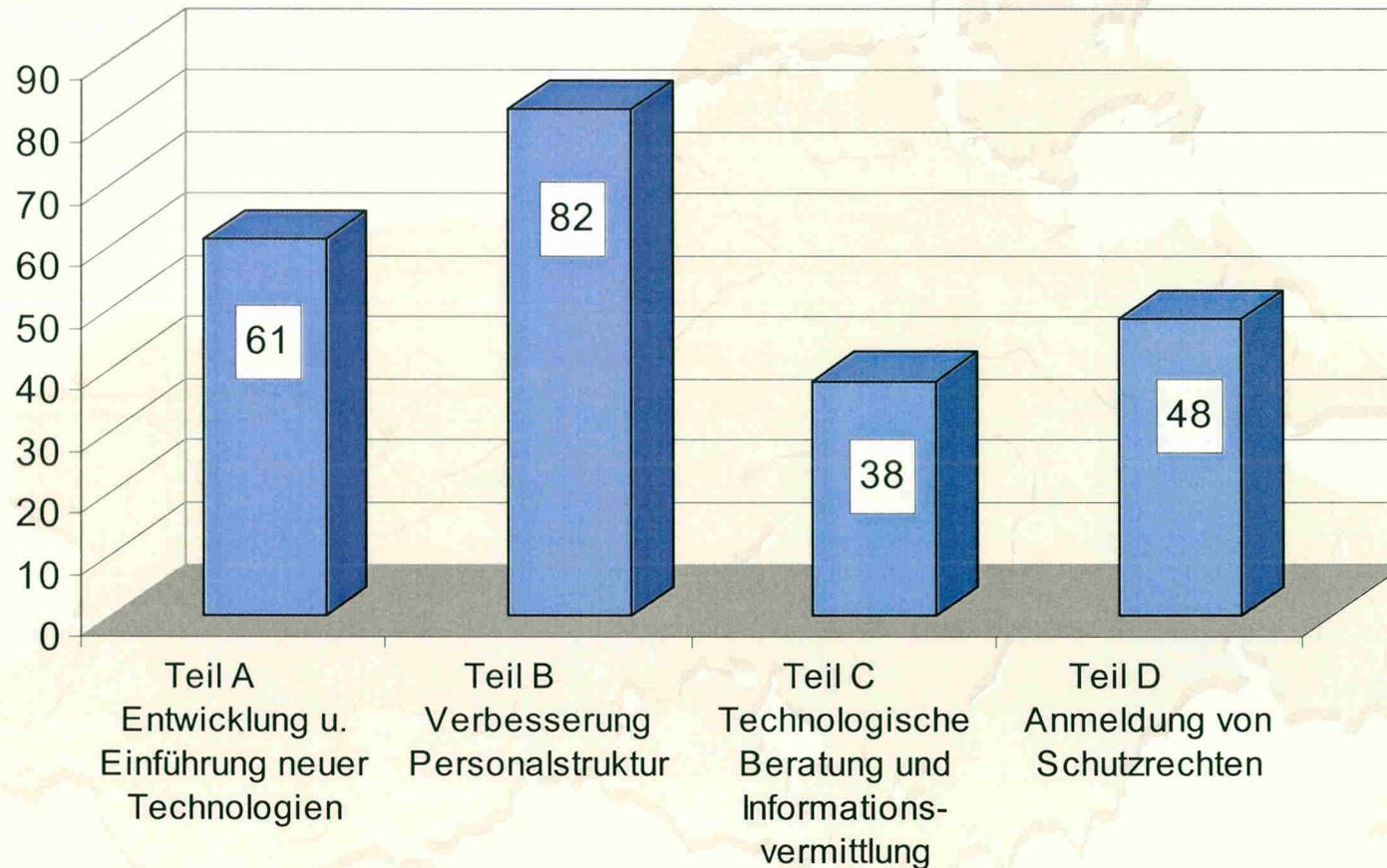


Technologie und Innovation

1. Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien
2. Verbesserung der Personalstruktur
3. Technologische Beratung/ Informationsvermittlung
4. Anmeldung von Schutzrechten



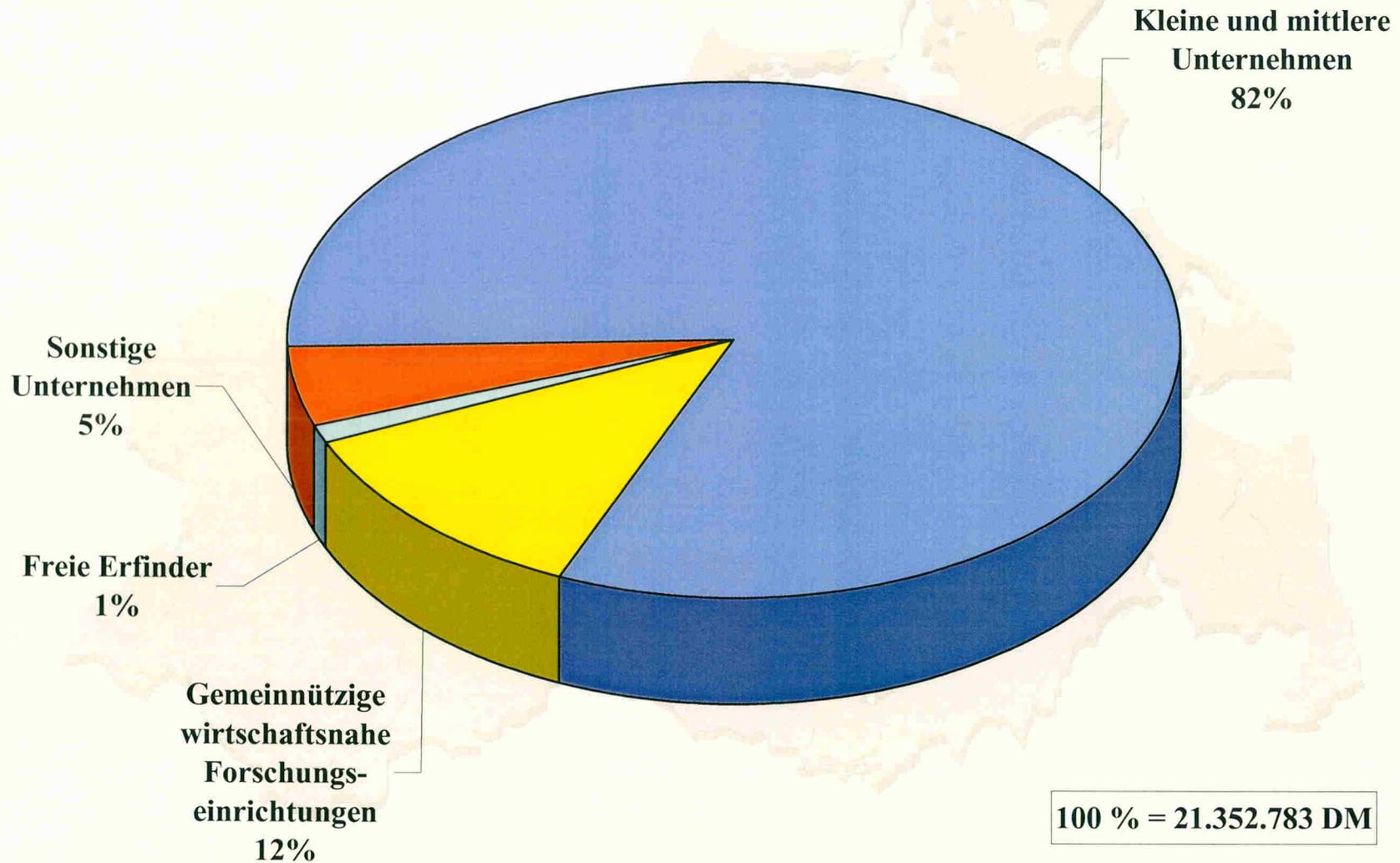
Technologie- und Innovationsförderung 2000



n = 229 Zuschuss = 21,35 Mio. DM

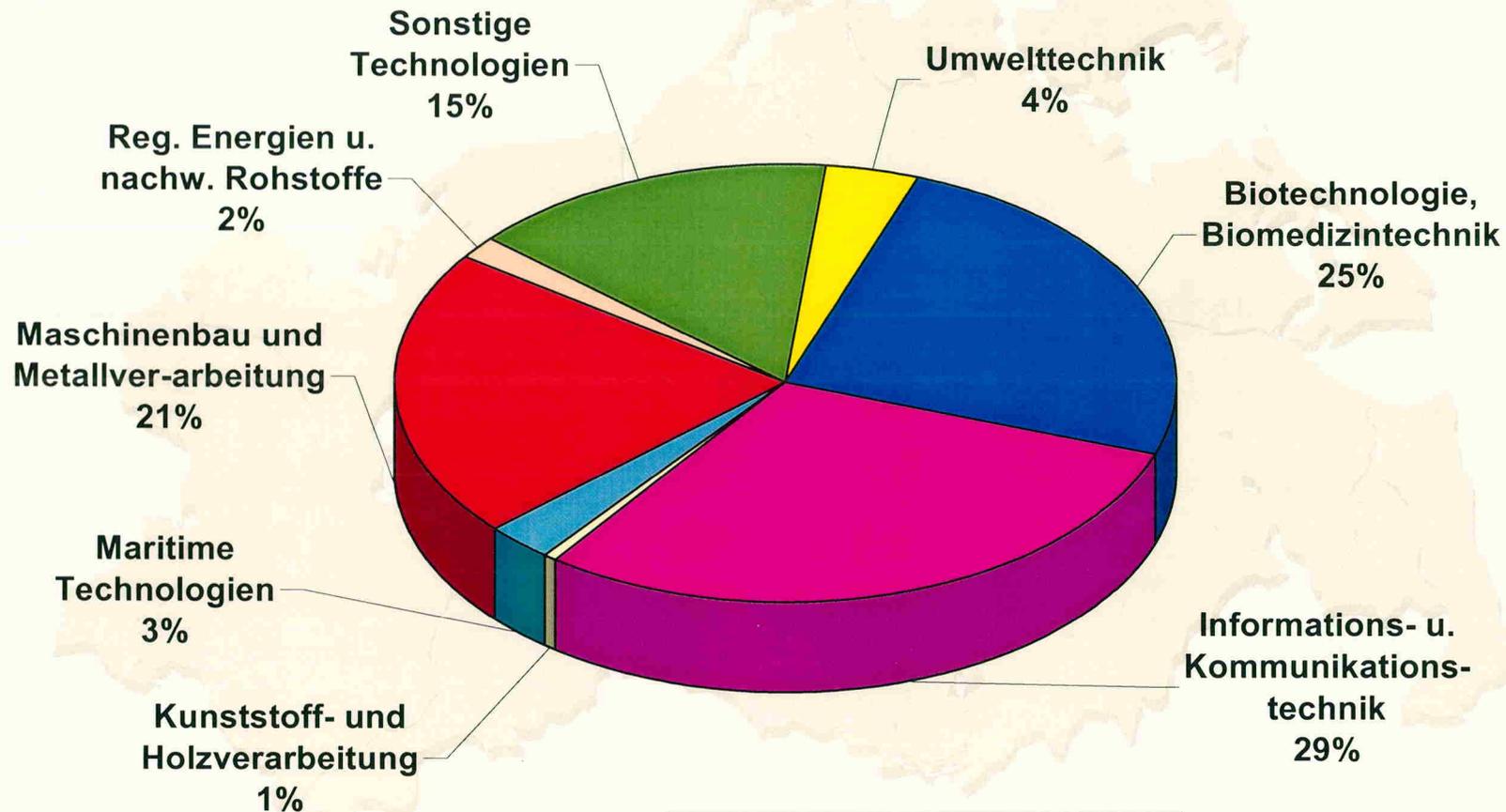


Zuschüsse nach Art der Antragsteller

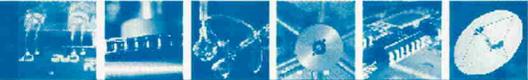




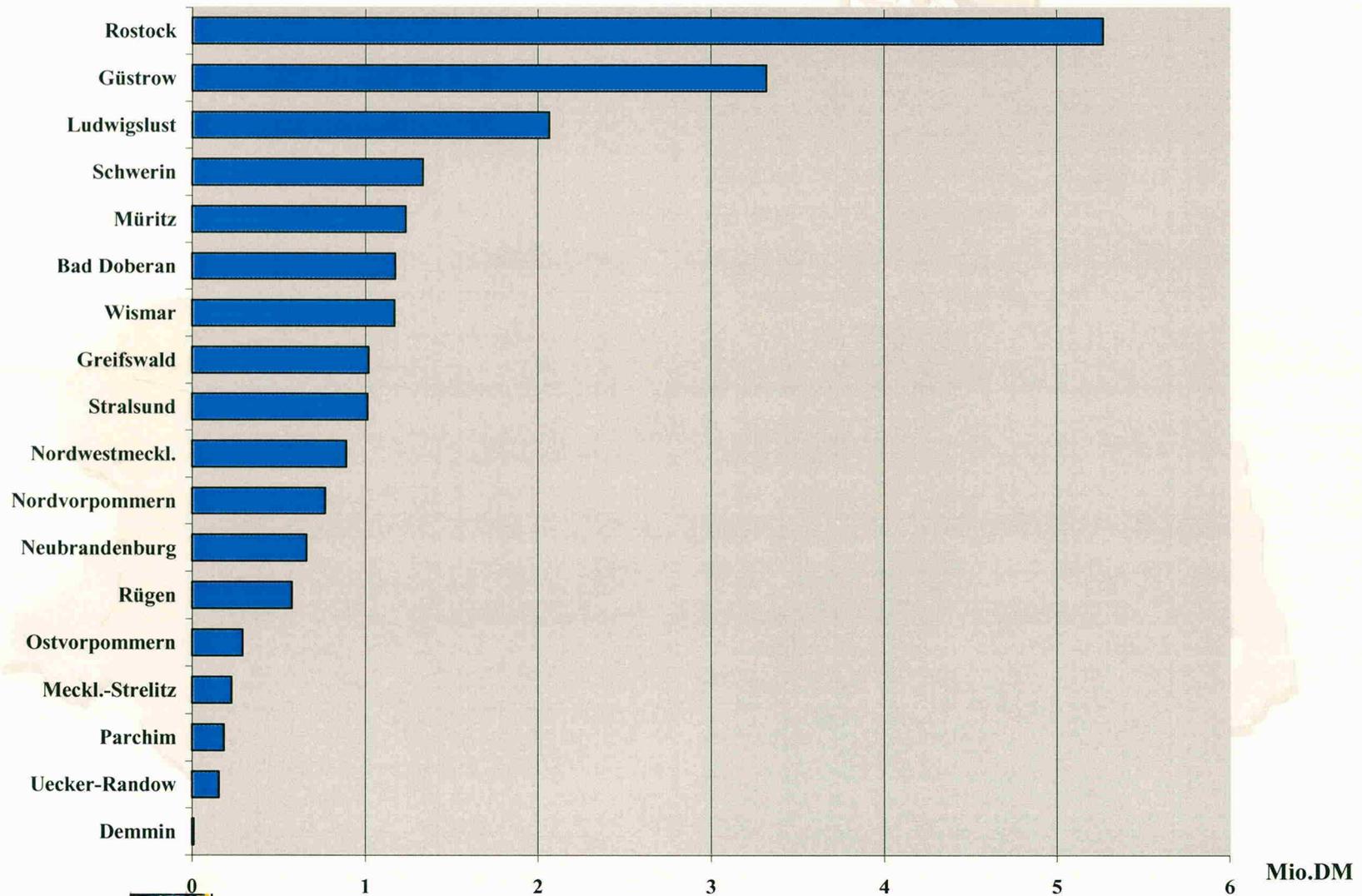
Zuschüsse nach Technologiefeldern des Wirtschaftsministeriums M-V

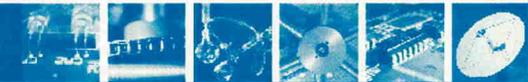


100 % = 21.352.783 DM

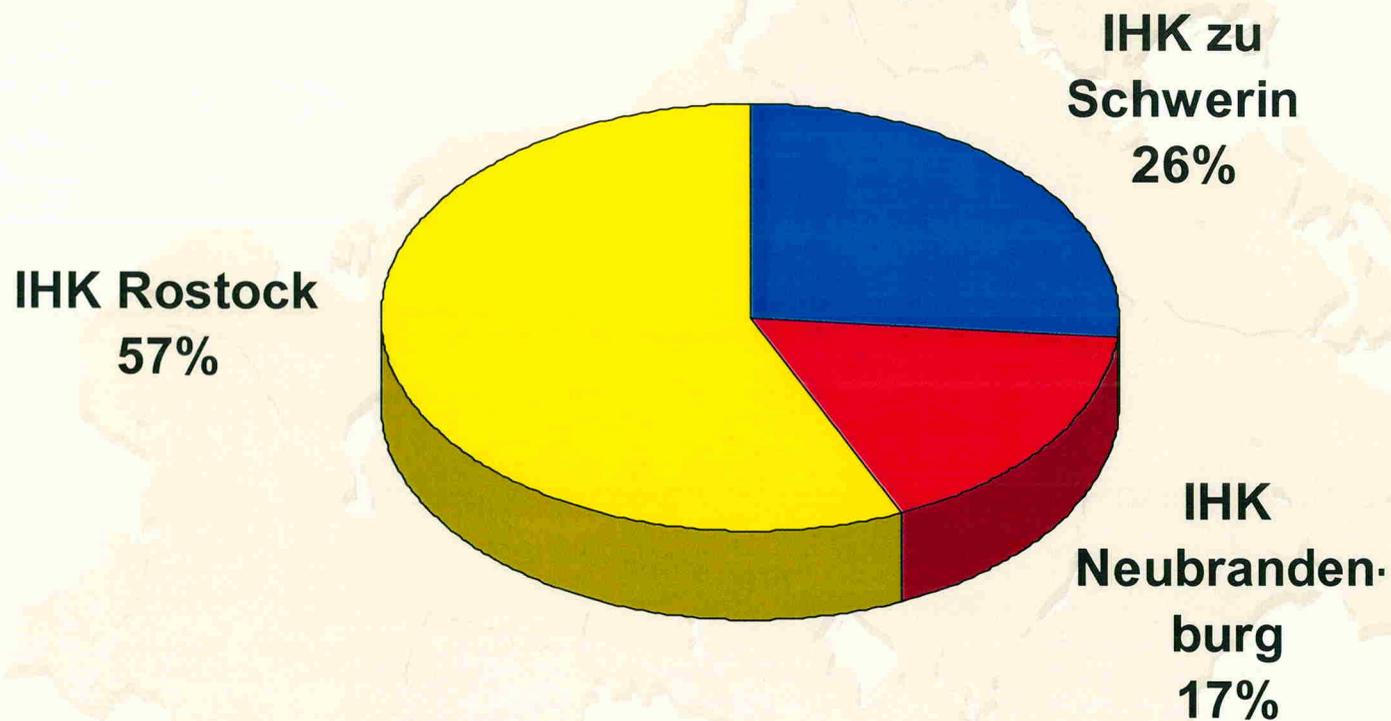


Zuschüsse 2000 nach Landkreisen





Prozentualer Anteil der Zuschüsse gegliedert nach IHK-Bezirke



100 % = 21.352.783 DM



Technologie und Innovation

1. Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien
2. Verbesserung der Personalstruktur
3. Technologische Beratung/ Informationsvermittlung
4. Anmeldung von Schutzrechten



Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien

Was:

Durchführung von Vorhaben mit dem Ziel der Erarbeitung neuer technischer Lösungen und deren Umsetzung in international wettbewerbsfähige Produkte, Verfahren und Leistungen
(ENTWICKLUNG)
der betrieblichen Umsetzung neuartiger Verfahren, insbesondere neuer Produktionstechnologien
(EINFÜHRUNG)



Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien

Wer und Wie:

Kleine und mittlere Unternehmen bis zu 50%
Sonstige Unternehmen bis zu 35%

Förderfähige Ausgaben:

Personalausgaben
Forschung- und Entwicklungsfremdleistungen
Materialausgaben für Prototypen
Investitionen in Meßtechnik
Sonstiges



Technologie und Innovation

1. Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien
2. Verbesserung der Personalstruktur
3. Technologische Beratung/ Informationsvermittlung
4. Anmeldung von Schutzrechten



Verbesserung der Personalstruktur

Was:

Gefördert werden neue Beschäftigungsverhältnisse mit Absolventen/innen wirtschaftsrelevanter Studiengänge einer Fachhochschule oder wissenschaftlichen Hochschulen.

Art der Tätigkeit erfordert die Qualifikation

Beschäftigungsverhältnis auf Dauer

Erstes Beschäftigungsverhältnis nach dem Studium



Verbesserung der Personalstruktur

Wer und Wie:

Kleine und mittlere Unternehmen bis zu 50%
max. 40 TDM im ersten, 20 TDM im zweiten Jahr

Sonstige Unternehmen bis zu 35%
max. 40 TDM im ersten Beschäftigungsjahr



Technologie und Innovation

1. Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien
2. Verbesserung der Personalstruktur
3. Technologische Beratung/ Informationsvermittlung
4. Anmeldung von Schutzrechten



Technologische Beratung Informationsvermittlung

Was:

Erarbeitung neuer technischer Lösungen
Umsetzung innovativer Produkte, Verfahren und
Leistungen in die Produktion
Einschätzung von Marktchancen für innovative
Produkte, Verfahren und Leistungen
Einführung und Anwendung neuer Verfahrenstechnologien, Betriebsorganisation, Logistik
Produktdesign



Technologische Beratung Informationsvermittlung

Wer und Wie:

Kleine und mittlere Unternehmen bis zu 50%
Sonstige Unternehmen bis zu 35%

Förderfähige Ausgaben:

Beratungsleistungen 15 TW á 1.000,- DM/TW
Zwei Informationsvermittlungen á 5.000,- DM /
Kalenderjahr



Technologie und Innovation

1. Vorhaben zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien
2. Verbesserung der Personalstruktur
3. Technologische Beratung/ Informationsvermittlung
4. **Anmeldung von Schutzrechten**



Anmeldung von Schutzrechten

Was:

Die Förderung dient der Sicherung von nationalen und internationalen Schutzrechten für Erfindungen.

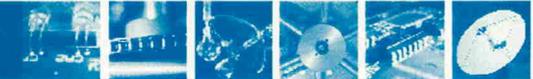
Wer und Wie:

Kleine und mittlere Unternehmen

Freie Erfinder

max. 50 TDM, bis zu 60%

Anwaltsgebühren, Patentgebühren, Ausgaben für Übersetzungen, Sachverständige, Recherchen



Patent- und Lizenzfonds Mecklenburg-Vorpommern

1. Darlehen für kleine und mittlere Unternehmen
2. Unterstützung Freier Erfinder
3. Bedingt rückzahlbare Darlehen für Existenzgründer



Grundidee:

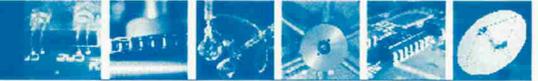
Weitestgehende finanzielle Risikoentlastung für Unternehmen und Freie Erfinder durch Übernahme von bis zu 100 % der anrechenbaren Kosten.

Angemessene Beteiligung des Fonds an den aus den Schutzrechten resultierenden wirtschaftlichen Erfolgen.

Ziel:

Gestaltung eines revolvierenden Fonds als neuartiges Förderinstrument für Technologie und Innovation.





www.tbi-mv.de



Projekträger für das Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern

Förderprogramme von der Idee bis zum Markt

Absatz- und Exporthilfe ————— Markt

Qualitätsmanagement/
Akkreditierungen — Qualitätssicherung

Technologie- und
Innovationsförderung — Entwicklung

Patent- und Lizenzfonds — Idee
Mecklenburg-Vorpommern



Fazit/Ausblick

Dr. Uwe Wurdel

Mit dem heutigen Innovationsforum haben wir einen nachhaltigen Überblick über die Aktivitäten, Ergebnisse und Kompetenzen der Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen des Landes Mecklenburg-Vorpommern im Bereich Wasserstofftechnologien erhalten. Die große Teilnehmerzahl an dem Innovationsforum unterstreicht das Interesse an dieser Problematik.

In den Vorträgen und Diskussionen wurden die komplexen Sachverhalte dieser Technologien anschaulich dargestellt und gleichzeitig die technologischen Entwicklungschancen für unsere Region aufgezeigt. Besondere Bedeutung kommt dabei der Vernetzung der Akteure in Mecklenburg-Vorpommern zu. Aus diesem Grunde bin ich insbesondere Herrn Dr. Lehnert vom ZSW Ulm für seinen Vortrag dankbar, in dem er die Erfahrungen aus Baden-Württemberg bei der Initiierung derartiger Netzwerke dargestellt hat. Wir streben in Mecklenburg-Vorpommern auch eine solche regionale Vernetzung unter Einbindung überregionaler Partner an und greifen deshalb das unterbreitete Diskussionsangebot dankbar auf.

In den Vorträgen ist nach meiner Auffassung auch deutlich geworden, dass noch viele technische, technologische und wirtschaftliche Fragestellungen beantwortet werden müssen, damit die Wasserstofftechnologien sich umfassend am Markt durchsetzen können. Damit sind zugleich auch Handlungsfelder für wissenschaftliche Einrichtungen und Unternehmen definiert worden. Hier gilt es in Zukunft die Kräfte zu fokussieren und Synergien zu schaffen. Durch das Land werden entsprechende Rahmenbedingungen gesetzt und weiter ausgebaut, um die Unternehmen bei Produkt und Verfahrensentwicklungen nachhaltig zu unterstützen.

Das heutige Innovationsforum hat aufgezeigt, dass in Mecklenburg-Vorpommern gute Voraussetzungen gegeben sind, um in spezifischen Segmenten dieses Technologiebereiches, z.B. bei maritimen Applikation in kurzer Zeit marktfähige Produkte und Dienstleistungen zu platzieren.

Ich bin davon überzeugt, dass mit der heutigen Veranstaltung ein wichtiger Meilenstein in der Entwicklung eines Netzwerkes Wasserstofftechnologien in Mecklenburg-Vorpommern gesetzt wurde und gleichzeitig Impulse für die weitere Entwicklung gegeben wurden.

Deshalb gilt mein Dank gilt allen Partnern und Einrichtungen, die zur Vorbereitung und dem erfolgreichen Gelingen dieses Forums beigetragen haben, insbesondere danke ich den Referenten für ihre Vorträge.

Unser Dank gilt auch dem BMBF, mit dessen finanzieller und ideeller Unterstützung wir dieses Forum vorbereitet und durchgeführt haben.

Teilnehmerliste

Teilnehmerliste der Tagung am 13. November 2001 in Rostock

| Nr. | Name | Firma/Institution |
|-----|--|---|
| 1 | Ahlhaus, Prof. Dr.-Ing. | Fachhochschule Stralsund |
| 2 | Bartels, Torsten | IFOD FH Wismar |
| 3 | Beckmann, Prof. Dr. Wolfgang | Fachhochschule Stralsund |
| 4 | Behrend, Eberhard | Deutscher Wasserstoffverbund, Berlin |
| 5 | Blank | TBI GmbH, Schwerin |
| 6 | Bludszweit, Prof. Dr.-Ing. habil Siegfried | MET Motoren- und Energietechnik GmbH, Rostock |
| 7 | Boede, Peter | Landesbauamt Rostock |
| 8 | Bogisch, Norbert | WIRO |
| 9 | Böhm, Karl-Heinz | |
| 10 | Böse, Rainer | Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen i.d. Produktion |
| 11 | Boysen, Karl | |
| 12 | Brandenburg, Maik | |
| 13 | Bruhn, Siegfried | |
| 14 | Bruhns, Dr. | ALMA MATER Consulting Berlin GmbH |
| 15 | Buchsteiner, Uwe | |
| 16 | Burstein, Udo | |
| 17 | Buttkewitz, Dr.-Ing. Gerhard | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 18 | Dethloff, Horst | WIRO |
| 19 | Donle, Dr. | energieplus e.V. |
| 20 | Eggers | TBI GmbH, Schwerin |
| 21 | Ellert | WIRO |
| 22 | Ernst, Dr. Gerhard | DLR-Projekträger des BMBF, Bonn |
| 23 | Fedke, Petra | FH Wismar |
| 24 | Fichtler, Torsten | HKF GmbH |
| 25 | Fink | GENIUS Venture Capital GmbH |
| 26 | Fleischer, Lutz | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 27 | Freier, Renate | |
| 28 | Gambert, Dr. R. | IT Dr. Gambert GmbH |
| 29 | Geier | UTR Umwelttechnik Rostock |
| 30 | Gerl, Roland | EWAG Energie- und Wasserversorgung AG, Nürnberg |
| 31 | Gienapp, Dr.-Ing. | VIW |
| 32 | Giese, Evelyn | |
| 33 | Grabert | TEDI |
| 34 | Gross | IKON Gross |
| 35 | Hagel, Wilfried | Unternehmensberatung Parchim |
| 36 | Hanck, Vera | Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern |
| 37 | Hapke, Prof. Dr.-Ing. Jobst | Technische Universität Hamburg-Harburg |
| 38 | Harzfeld, Dr.-Ing. Georg | H2-Innovationslabor |
| 39 | Hermann, Doris | |

| Nr. | Name | Firma/Institution |
|-----|---------------------------------|---|
| 40 | Hildebrand, Uwe | |
| 41 | Hilscher, | TZW |
| 42 | Hinz, Burkhard | |
| 43 | Hochstatter | KGW |
| 44 | Hoff, | Universität Rostock, Institut für Fertigungstechnik u. Logistik |
| 45 | Hofstädter | Duchow Lüftungstechnik |
| 46 | Jahnke, Ines | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 47 | Jakobs, Dr. Steffen | Universität Greifswald, Institut für Chemie/Biochemie |
| 48 | Janetzki, Steffen | MET Motoren- und Energietechnik GmbH, Rostock |
| 49 | Junge, Dr. Kathrin | Institut für Organische Katalysforschung |
| 50 | Kautz | Universität Rostock, Institut für EUT |
| 51 | Keller, Helmut | MAWEKA |
| 52 | Kickulies, Marc | HDW Kiel |
| 53 | Klingberg, Walter | |
| 54 | Klüber, Uwe | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 55 | Kluge, Andreas | Krüger-Pflanzenkläranlagen GmbH |
| 56 | Knispel, Jürgen | e.dis NATUR Erneuerbare Energien GmbH |
| 57 | Koch, Roland | Umweltministerium M-V |
| 58 | Kokowsky, Mario | Oberfinanzdirektion Rostock |
| 59 | Koller | OT Oberflächentechnik GmbH & Co. KG |
| 60 | Krauß, Prof. Dr. | Fachhochschule Wismar |
| 61 | Kreutz, Dr.-Ing. Klaus-Bernhard | Linde AG |
| 62 | Krug | Messer Griesheim |
| 63 | Krüger, Johann | Krüger-Pflanzenkläranlagen GmbH |
| 64 | Kruse, Dr. Dieter | Amt für Wifö Rostock |
| 65 | Kruß, Albrecht | FH Wismar |
| 66 | Künster, Dr.-Ing. | Universität Rostock, Institut für EUT |
| 67 | Kuntze, Thomas | |
| 68 | Ladenthin, Carsten | ROSOMA |
| 69 | Lehnert | ZSW Ulm |
| 70 | Lehnert, Dr.-Ing. Werner | ZSW Ulm |
| 71 | Lieckfeldt, Dr. | GTA |
| 72 | Luckmann, Henk | |
| 73 | Lust | IHK Schwerin |
| 74 | Maletzki | Rational GmbH |
| 75 | Mamzed | Ing.-Büro Mamzed |
| 76 | Menzel, Heiner | WEMAG AG Schwerin |
| 77 | Meschate, Wolfgang | STAUN Stralsund |
| 78 | Mielke, S. | VIW |
| 79 | Millat, Dr. | IFMW |
| 80 | Möller, Stephan | FH Wismar |

| Nr. | Name | Firma/Institution |
|-----|----------------------------------|--|
| 81 | Niempel, Udo | |
| 82 | Paschen, Eckhard | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 83 | Pätz | Anemometerbau GmbH |
| 84 | Pfeiffer, Ingo | DIW Berlin |
| 85 | Pinetzki | IFQ GmbH Wismar |
| 86 | Pruin, Berend | SCHIFFKO GmbH |
| 87 | Purps, Peter | Mättig |
| 88 | Radig, Dieter | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 89 | Redlin, Prof. Dr. | Fachhochschule Wismar |
| 90 | Reichel, MDg Gerd-Rüdiger | Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern |
| 91 | Reichelt, Lutz | L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn |
| 92 | Renter, Linda Luisa | FH Wismar |
| 93 | Richter | TBI GmbH, Schwerin |
| 94 | Riechmann, Frank | enviba AG |
| 95 | Rohland, Dr.-Ing. | GAT GmbH |
| 96 | Roller, Günter | e.dis NATUR |
| 97 | Roloff, Norbert | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 98 | Sattler, Gunter | HDW |
| 99 | Scharr, Prof.-Dr. Günter | Universität Rostock |
| 100 | Scherer | Rhön-Klinikum AG, Bad Neustadt/Saale |
| 101 | Schindler, Jörg | L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn |
| 102 | Schlott | INP e.V. Greifswald |
| 103 | Schmidt, Dr.-Ing. Brigitte | SIMV e.V. |
| 104 | Schmidt, Wilhelm | P & T Technology AG |
| 105 | Schönherr | FH Eberswalde |
| 106 | Schöpke | Messer Griesheim |
| 107 | Schröder, Hartmut | |
| 108 | Schuldzig, | GAT GmbH |
| 109 | Schwandt, Uwe | |
| 110 | Sebald, Hans-Jürgen | |
| 111 | Seibt, Cristian | P & T Technology AG |
| 112 | Stabenow, Uwe | TZW |
| 113 | Stammer | |
| 114 | Steinberger-Wilckens, Dr. Robert | PLANET Planungsgruppe Energie und Technik, Oldenburg |
| 115 | Svoboda, Ralf | TBI GmbH, Schwerin |
| 116 | Templin, Klaus-Dieter | |
| 117 | Tetzlaff, Karl-Heinz | DWV |
| 118 | Teubner, Manfred | |
| 119 | Thiel, Karl-Heinz | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 120 | Tiede | Fachhochschule Stralsund |
| 121 | Timm, Ute | Weiterbildungsgesellschaft an der Universität Rostock e.V. |

| Nr. | Name | Firma/Institution |
|-----|----------------------|---|
| 122 | Ullerich | Webasto |
| 123 | Voelker | Germanischer Lloyd |
| 124 | Vögele, Dr. Gerald | HNP |
| 125 | Waldheim, Manfred | Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie |
| 126 | Wamp, Dieter | |
| 127 | Weißhoff | IBZ Hohen Luckow |
| 128 | Westendorf | Unternehmensberatung Parchim |
| 129 | Wex, Dr. K. | IT Dr. Gambert GmbH |
| 130 | Wienecke, Dr. Andrea | FH Wismar |
| 131 | Wurdel, Dr.-Ing. Uwe | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 132 | Würsig, Dr.-Ing. | Germanischer Lloyd |
| 133 | Zabel | ENUM |
| 134 | Zahn, Dr. | PT Jülich Warnemünde |
| 135 | Zähring, Heidrun | ATI Küste GmbH, Rostock |
| 136 | Zöllner, Dr. | WiMi |