

Demonstrationsmodelle zeigen Vorteile der Wasserstofftechnik

# Weg zur Einführung des Solar-Wasserstoffs

**Wasserstoff ist das leichteste und häufigste Element des Sonnensystems. Die Sonne besteht noch rund zur Hälfte aus Wasserstoff und verbrennt dort in Kernfusionsprozessen zu Helium. Auf der Erde eignet sich Wasserstoff als leicht transportierbarer und gut speicherbarer Brennstoff, der aus Sonnenenergie oder anderen Energiequellen gewonnen werden kann. Der Solare Wasserstoff wird langfristig zur Deckung des Energiebedarfs der modernen Zivilisation beitragen und die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas verdrängen.**

Der besondere Vorteil des Wasserstoffs ist seine gegenüber Elektrizität sehr gute Speicherfähigkeit. Wasserstoff eignet sich hervorragend als Langzeitspeicher und kann die zeitlichen Energieangebotschwankungen ausgleichen, die den Einsatz regenerativer Energiequellen bislang erschweren.

Im einfachsten Fall ist Wasserstoff unter Druck speicherbar, z. B. in Tanks oder Pipelines. Andere Speicherformen sind die kryogene Speicherung (Wasserstoff verflüssigt sich bei  $-253\text{ °C}$ ) oder chemische Speicher.

Der  $\text{CO}_2$ -neutrale Kreislauf einer Energieversorgung mit Wasserstoff wird in Abb. 1 erläutert. Der Wasserstoff wird durch Elektrolyse aus reinem (destilliertem) Wasser gewonnen. Der Wasserstoff wird zur energetischen Nutzung wieder verbrannt, dabei entsteht Wasser, welches wieder der Elektrolyse zur Verfügung stehen kann. Der stoffliche Kreislauf ist somit geschlossen, Abgase in Form von  $\text{CO}_2$  entstehen nicht.

Die Verbrennung des Wasserstoffs erfolgt mit offener Flamme (Zentralheizungen, Gaslampen), mit katalytischen Brennern (ohne Flamme), in Motoren (z. B. Ottomotoren für Kraftfahrzeuge), in Turbinen (Flugzeugantrieb) oder in Brennstoffzellen – sowohl für stationäre

als auch für mobile Anwendungen. Motoren erzeugen ein Drehmoment, Brennstoffzellen erzeugen mit vergleichsweise hohem Wirkungsgrad elektrischen Strom z. B. für die Spitzenlastabdeckung bei Stromversorgungen. Wasserstoffbetriebene Stromaggregate und Brennstoffzellen können zu Blockheizkraftwerken (BHKW) ausgebaut werden. Mit ihnen können Strombedarfsspitzen bei gleichzeitiger Nutzung der Abwärme abgefangen werden.

## Die Grundlagen

Ebenso wie bei der Photovoltaik wird die Einführung der Wasserstofftechnik durch die Konkurrenzsituation mit fossilen Energieträgern erschwert. Auf absehbare Zeit wird für energetische Wasserstoffanwendungen keine Wirtschaftlichkeit erreicht werden können, es sei denn, es erfolgt eine grundlegende und konsequente Neubewertung der  $\text{CO}_2$ -Problematik. Zur Einführung ist es daher notwendig, anhand von geeigneten Demonstrationsmaterialien die globalen wie auch die regionalen Vorteile des Solaren Wasserstoffs aufzuzeigen.

Die transparenten und funktionsfähigen Modelle, deren Grundlagen in diesem Beitrag erläutert werden, eignen sich sowohl für Vorführungen als auch für quantitative Messungen im Labor. Die Erläuterungen werden anhand des Photovoltaik-Moduls PV-22-T vorgenommen, welches – mit fünf in Reihe geschalteten Solarzellen – eine für den 1-zelligen Elektrolyseur EP-35-V angepasste Spannung erreicht.

Belastet man ein konstant beleuchtetes Photovoltaik-Modul durch einen von außen angeschlossenen Verbraucher mit veränderlichem Widerstand, so erhält man als Ergebnis diejenige Kennlinie, die alle möglichen Strom-/Spannungs-Arbeitspunkte zwischen den beiden Extremwerten Kurzschlußstrom und Leerlaufspannung enthält. Den Punkt des Leistungsmaximums nennt man bekanntlich den Maximum Power Point

(MPP). Die MPPs bei  $500\text{ W/m}^2$  und  $1.000\text{ W/m}^2$  solarer Einstrahlung sind für ein monokristallines PV-Lehrmodul mit  $22\text{ W}_p$  Nennleistung in Abb. 2 eingetragen ( $20\text{ °C}$  Modultemperatur, Am 1,5).

Für die Elektrolyse wird ein hoher Strom und eine geringe Spannung benötigt, daher liegen der Kurzschlußstrom des PV-Moduls bei  $9,6\text{ A}$  und die Leerlaufspannung bei  $2,9\text{ V}$ . Bei geringerer Einstrahlung (oder einem von  $90^\circ$  abweichenden Einstrahlungswinkel) sinkt der vom PV-Modul abgegebene Strom stärker als die Spannung. Die Aneinanderreihung der MPPs bildet annähernd eine Gerade, die parallel zur Elektrolyse-Kennlinie liegt.

Auch elektrische Verbraucher haben eine Strom-/Spannungskennlinie. Im rein ohmschen Fall verläuft diese nach dem Ohmschen Gesetz ( $I = U/R$ ) ab dem Nullpunkt in einer Geraden. Wir betrachten die Kennlinie der Elektrolyse.

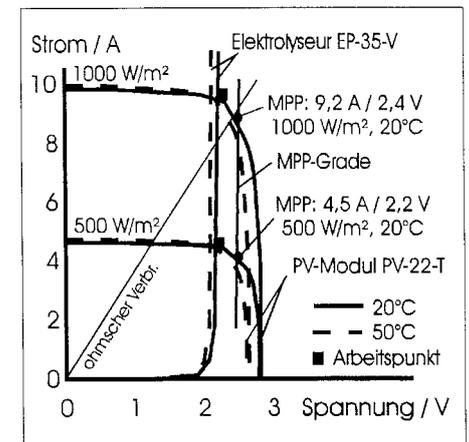


Abb. 2: Kennlinien des  $22\text{ W}_p$ -PV-Moduls und des Elektrolyseurs EP-35-V. Als Arbeitspunkt stellen sich Strom und Spannung auf den Schnittpunkt der Kennlinien ein. Bei erhöhter Betriebstemperatur reduziert sich die Spannung sowohl für das PV-Modul als auch für den Elektrolyseur.

Für die Elektrolyse ist eine Mindestspannung notwendig. Unterhalb dieser kann keine Elektrolyse stattfinden. Erst ab  $1,48\text{ V}$  theoretischer Zersetzungsspannung beginnt der Elektrolyseprozess und ab ca.  $2\text{ V}$  steigt der Elektrolysestrom stark an. Die Kennlinie ist von der Elektrolytemperatur abhängig. Für  $20\text{ °C}$  beginnt sie bei  $2,1\text{ V}$  und für  $50\text{ °C}$  bei  $1,9\text{ V}$  (Angaben pro Zelle auch für mehrzellige Elektrolyseure).

Beim Anschließen des Elektrolyseurs an das PV-Modul stellt sich derjenige Arbeitspunkt ein, der sowohl auf der Elektrolyse-Kennlinie, als auch auf der PV-Modul-Kennlinie liegt (Schnittpunkt der Kennlinien). Bei der Planung eines Photovoltaik-Elektrolyse-Systems versucht man natürlich, PV-Generator und Elektrolyseur so aneinander anzupassen, daß

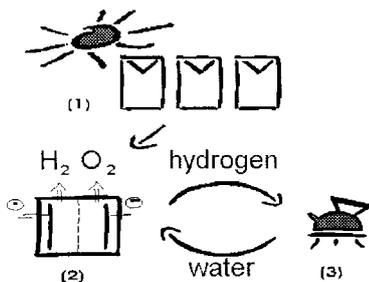


Abb. 1: Photovoltaik-Module (1) liefern umweltfreundlich Solarstrom. Ein Elektrolyseur (2) erzeugt daraus den speicherfähigen Wasserstoff. Das Gas findet eine vielfältige Verwendung, z. B. in katalytischen Brennern (3). Das bei der Verbrennung entstehende Wasser steht der Elektrolyse wieder zur Verfügung [1].

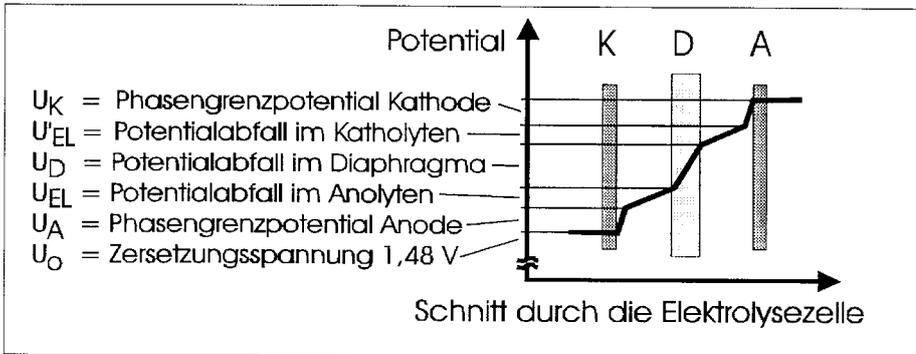


Abb. 3: Potentialabfall innerhalb einer Elektrolysezelle. Zusätzlich zur theoretische Zersetzungsspannung von 1,48 V addieren sich noch die Phasengrenzpotentiale an Anode (A) und Kathode (K) und die Spannungsabfälle im Elektrolyten und im Diaphragma (D). Nur der Anteil der theoretische Zersetzungsspannung bestimmt die Gasproduktion, die anderen Spannungen bewirken Wärmeverluste.

der Arbeitspunkt im oder in der Nähe des MPP liegt. Dies erfolgt durch eine Spannungsanpassung der in Reihe geschalteten Solarzellen oder durch eine Änderung der Zellenanzahl beim Elektrolyseur. Im Idealfall liegen die Elektrolyse-Kennlinie und die MPP-Grade übereinander. Eine kleinere Abweichung zu einer geringeren Arbeitsspannung hin ist üblich, da sich die Betriebssicherheit der Elektrolyse bei nur geringer Leistungseinbuße erhöht.

Bei geringen Leistungen bis 1 kW ist das hier gezeigte direkte Aneinanderkopeln von (spannungsmäßig angepasstem) PV-Generator und Elektrolyseur möglich. Bei der Elektrolyse können keine zu hohen oder zu geringen Spannungen auftreten, da die Elektrolyse die Spannung vorgibt. Somit werden schädigende Auswirkungen vermieden. Es kann – im Gegensatz zu Batterieladesystemen – auf einen Laderegler verzichtet werden.

Versuche haben gezeigt, daß MPP-Regler (als Tiefsetzsteller) bei einer Leistung ab 1,5 kW<sub>p</sub> einen Energiemehrtrag von ca. 5 % ermöglichen. Es ist je nach den örtlichen Gegebenheiten abzuwägen, ob ein Regler vorteilhaft eingesetzt werden kann. Der Einsatz eines MPP-Reglers oder eines Spannungskonverters ist zu empfehlen, wenn starke Strahlungsschwankungen, hohe Temperaturschwankungen oder hohe Leitungsverluste auftreten.

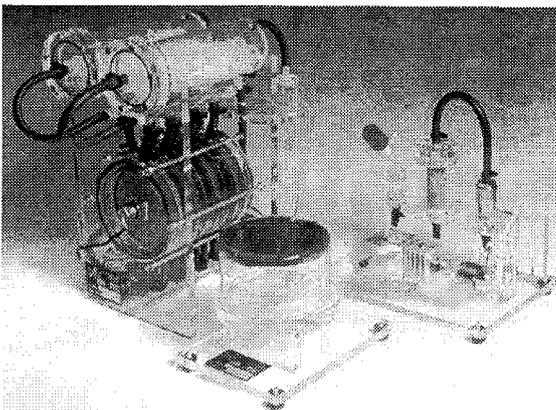


Abb. 4: Elektrolyse Lehrmodell

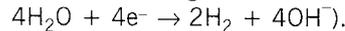
### Alkalische Elektrolyseure als Demonstrationsobjekte

Die alkalische Elektrolyse, d. h. die Elektrolyse mit einer Kaliumhydroxidlösung, ist heute das einzige Elektrolyseverfahren, welches mit vertretbarem Kostenaufwand auch für höhere Leistungen eingesetzt werden kann. Weltweit wurden alkalische Elektrolyseure mit einer elektrischen Gesamtleistung von annähernd 600 MW aufgebaut, davon einige an Staudämmen mit Leistungen über 100 kW, die mit Erfolg und zu wirtschaftlich akzeptablen Bedingungen arbeiten [2].

Das nachfolgend beschriebene 1-zellige Elektrolysemodell EP-35-V basiert auf der alkalischen Elektrolyse. Andere Elektrolyseverfahren sind noch in Entwicklung, z. B. die Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (HOT-ELLY) oder die Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse).

Beim Anlegen einer Gleichspannung bilden sich Gasblasen an Elektroden, die in Wasser eingetaucht sind. An der negativen Elektrode (Kathode) entsteht Wasserstoff, an der positiven Elektrode (Anode) entsteht Sauerstoff. Es finden je ein Reduktionsvorgang und ein Oxidationsvorgang statt.

An der Kathode wird Wasser unter Aufnahme von Elektronen in Wasserstoff und Hydroxidionen zerlegt (Reduktion:



Die negativ geladenen Hydroxidionen wandern zur Anode, wo sie unter Abgabe von Elektronen in Wasser und Sauerstoff zerlegt werden (Oxidation:  $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ ). Für die Bruttoreaktion ( $\text{H}_2\text{O} + \text{Energie} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ ) wird eine Energiemenge von 285,84 kJ/mol benötigt, die auch molare Reaktionsenthalpie genannt wird.

Die Gase sammeln sich auf den Elektrodenoberflächen, lösen sich ab und steigen nach oben.

## Solares Heizen

Ein Seminar des DGS-Fachaussschuß Thermie München, 11. März 1997

- Solarluftheizungen
- Überdimensionierung
- Speicherwände
- Saisonale Wärmespeicherung
- Solare Nahwärmekonzepte



Tagungsband  
20,- DM inkl. Versand

DGS-Sonnenenergie Verlags-GmbH

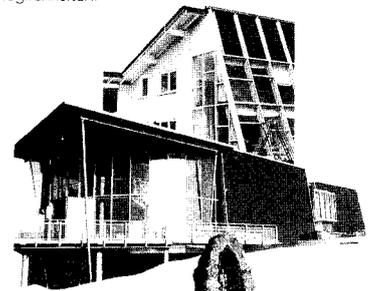
Augustenstraße 79 • 80333 München  
Tel.: 089/524071 • Fax: 089/521668  
eMail: SE@DGS-Solar.org

## SOLAR ENERGIE

... ein Schritt in die Zukunft

### SOLAR • LUFT • SYSTEME

Ein Schritt in die Zukunft!  
Profitieren Sie von unseren Solar-Luft-Systemen, die Sonnenenergie in kostenlose Raumwärmesystemen transformieren. Sie erzielen damit Heizkosteneinsparungen von bis zu 50% pro Jahr. Zusätzlich schafft die problemlose Integration in Dach oder Fassade interessante Gestaltungsmöglichkeiten.



Zu unseren Referenzen zählen nach zwei Jahrzehnten Projekterfahrung und permanenter Forschungs- und Entwicklungsarbeit zahlreiche Werkhallen, Turnhallen, Schwimmhallen sowie Wohnanlagen und Einfamilienhäuser. Wenn auch Sie den Schritt in die Zukunft gehen wollen, fordern Sie gleich unser Informationsmaterial an.



## GRAMMER

SOLAR • LUFT • TECHNIK

Werrther-von-Braun-Str. 6 • 92224 Amberg  
Tel.: 0 96 21/601-151 Fax: 0 96 21/601-260

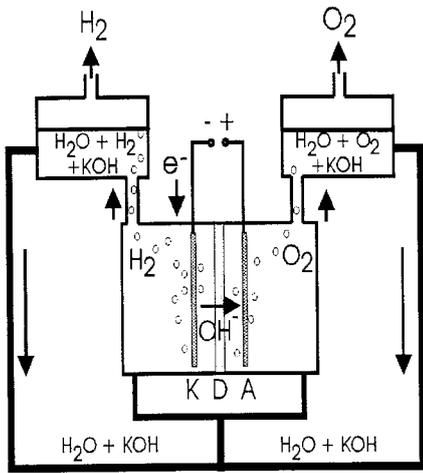


Abb. 5: Aufbau des 1-zelligen Elektrolysemodells, in dem destilliertes Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt wird.

Damit sich die Gase nicht zu einem Knallgasgemisch vermischen, müssen Anode und Kathode durch ein gasundurchlässiges Diaphragma getrennt werden.

Nach dem Faraday-Gesetz ( $m = c \times I \times t$ ) ist die erzeugte Gasmenge  $m$  proportional zum Strom  $I$ , der während der Zeit  $t$  fließt. Den Proportionalitätsfaktor  $c$  nennt man auch elektrochemisches Äquivalent.

Da Wasser ein schlechter Stromleiter ist und nur geringe Stromstärken zuläßt, fügt man dem Wasser üblicherweise Kalilauge zu. Das Kalilauge-Wasser-Gemisch hat eine hohe Leitfähigkeit, die bei einer 30 Gew.-%igen KOH-Konzentration ein Maximum erreicht.

Wie bereits erwähnt, braucht man eine höhere Spannung als die theoretische Zersetzungsspannung  $U_0 = 1,48 \text{ V}$ , um das Wasser zu zerlegen. Die Blasenbildung tritt erst ab 1,9 bis 2,0 V auf.

Abb. 3 gibt die Erklärung dafür. Zu der Zersetzungsspannung addieren sich die Spannungsabfälle an der Elektrode, im Elektrolyten („Gaspolster“ zwischen Elektrode und Elektrolyten) und im Diaphragma. Es kommt darauf an, diese Spannungsabfälle (bzw. Widerstände) zu minimieren, denn in diesen ohmschen Widerständen wird lediglich Wärme erzeugt. Elektrolyseure höherer Leistung benötigen daher zur Kühlung einen Wär-

metauscher – eine Abwärmenutzung ist hierbei möglich.

Das 35 W-Elektrolyse-Lehrmodell EP-35-V besteht aus einem 1-zelligen Zellblock und zwei Separationsbehältern. Das Diaphragma besteht aus Ryton-Fils oder einem anderen hydroxidionendurchlässigen Material. Die beiden Elektroden liegen zur Minimierung der Spannungsabfälle  $U_{EL}$  und  $U'_{EL}$  direkt auf dem Diaphragma auf. Die Gase entstehen an der Grenzfläche Metall-Elektrolyt.

Damit die Gase abgeführt werden können und neuer Elektrolyt nachfließen kann, müssen die Elektrodenbleche perforiert sein. Die Gase steigen in Separationsbehälter, die zur besseren Gasabscheidung mit PAL-Ringen gefüllt sind. Dort trennt sich das Gas vom Elektrolyten und wird über Ablass-Stutzen entnommen. Der gasfreie Elektrolyt fließt wieder in die Elektrolysezelle zurück (Abb. 5).

Die Stromzuführung für das transparente Elektrolyse-Lehrmodell kann mit einem Labor-Netzgerät oder mit dem beschriebenen Photovoltaikmodul erfolgen. Es werden auch Modelle mit anderen Leistungen und Brennstoffzellen auf PEM-Basis gefertigt.

### Katalytische Brenner als Lehrmodelle

Katalytische Brenner dienen zur Erzeugung von Wärme, welche durch die Rekombination der beiden Gase Wasserstoff und Sauerstoff entsteht. Die Rekombination erfolgt unter Zuhilfenahme von als Katalysator wirkenden Edelmetallen. Die Verbrennung erfolgt ohne Flamme bereits ab Raumtemperatur, daher nennt man diese Art der Verbrennung auch die „kalte“ oder „flammlöse“ Verbrennung (im Gegensatz zur Verbrennung mit offener Flamme, bei der die Zündtemperatur bei 560 °C und die Flammentemperatur in Luft bei 2.045 °C liegt).

Katalytische Brenner können sehr vielseitig eingesetzt werden, z. B. in Kochplatten oder in Raumheizungen. Sie erreichen Temperaturen bis 200 °C. Der untere Heizwert des Wasserstoffs (ohne Kondensationsenergie) liegt bei 33,3 kWh/kg und der obere Heizwert

(mit Kondensationsenergie) bei 39,5 kWh/kg.

Bei der katalytischen Verbrennung wird die Energie abgegeben, die dem unteren Heizwert des Wasserstoffs entspricht. Diesen Effekt machen sich auch die Lehrmodelle zunutze. Strömt Wasserstoff und Sauerstoff auf den edelmetallhaltigen Katalysator, so steigt durch die Reaktion ( $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Wärme}$ ) die Temperatur sehr schnell an.

Um die Temperatur zu begrenzen, wird vor die Katalysatormatte eine Diffusionsmatte gepreßt. Bevor die Gase Wasserstoff und Sauerstoff auf den Katalysator treffen, müssen sie durch die poröse Diffusionsmatte strömen. Der ebenfalls durch die Diffusionsmatte zurückströmende Wasserdampf sorgt dafür, daß der Gaszutritt begrenzt wird.

Die Brennerleistung und -temperatur werden nicht durch den Katalysator, sondern durch Art und Dicke der Diffusionsmatte, das Gasangebot und die abgeführte Wärmemenge bestimmt. Je nach Modelltyp wird der Sauerstoff aus der Elektrolyse (KG-78) oder aus der Umgebungsluft verwendet (KG-05).

### Höhere Leistungen bei Elektrolyseanlagen leicht erreichbar

Zur Einführung der  $\text{CO}_2$ -neutralen Solaren Wasserstofftechnik ist es notwendig, anhand von Demonstrationsmodellen die globalen wie auch die regionalen Vorteile dieser Technologie aufzuzeigen. Die in diesem Beitrag erläuterten Funktionen der Elektrolyse und der katalytischen Verbrennung sind ausnahmslos und ohne aufwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, wie es beispielsweise bei der Photovoltaik der Fall war, auch auf größere Leistungen übertragbar.

Alkalische Elektrolyseanlagen wurden bereits bis in den 100 kW-Bereich gefertigt und werden noch heute bei der Wasserkraftnutzung eingesetzt. Da die grundlegende Technik bekannt ist, ist die technische Realisierung von noch höheren Leistungen denkbar, ohne daß neues Know-how erarbeitet werden müßte.

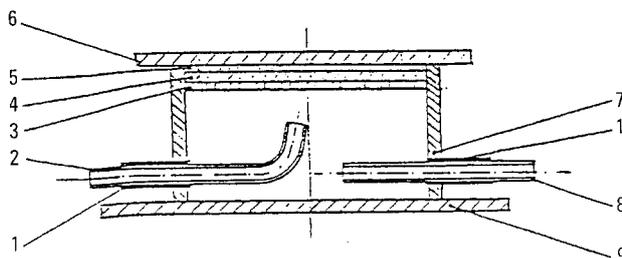
Martin Strippel

### Literatur

- /1/ Ingenieurbüro WA-TEC, Darmstadt, Lehrmodelle Solarer Wasserstoff. Internet-Homepage <http://members.aol.com/Strippel>, Juni 1997
- /2/ Volker U. Hoffmann, Wasserstoff - Energie mit Zukunft. Teubner Verlag, Stuttgart und Verlag der Fachvereine, Zürich, 1994, S. 43

Über den Autor

Dipl.-Ing. Martin Strippel leitet das Ingenieurbüro WA-TEC in Darmstadt, das Lehrmodelle zur solaren Wasserstofftechnik fertigt und vertreibt (Tel.: 06151/351780).



- 1 Verstärkungshülse
- 2 O<sub>2</sub>-Zuleitung
- 3 Anpreßgitter
- 4 Diffusionsmatte
- 5 Katalysatormatte
- 6 Wärmetauscher
- 7 Gehäuse
- 8 H<sub>2</sub>-Zuleitung
- 9 Grundplatte

Abb. 6: Aufbau eines Modells zur katalytischen Verbrennung. Die durch die Diffusionsmatte (4) begrenzte Wasserstoffzufuhr bestimmt die Brennerleistung.