



HEAG NaturPur

[www.naturpur-ag.de](http://www.naturpur-ag.de)

Erfahrungen mit Brennstoffzellen-Heizkraftwerk

## Perspektive für eine zukünftige Energieversorgung

Prospects for a future supply of energy

Dipl.-Ing. Josef Werum, HEAG NaturPur AG,  
Patrick Biehle, HEAG NaturPur AG,





Erfahrungen mit Brennstoffzellen-Heizkraftwerk

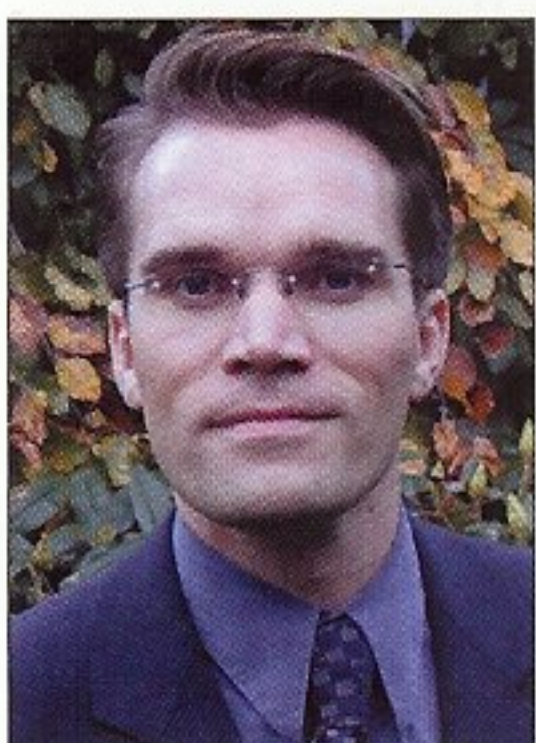
## Perspektive für eine zukünftige Energieversorgung

Prospects for a future supply of energy

Die Verfasser skizzieren den Aufbau einer zukünftigen Stromversorgung in Deutschland basierend auf erneuerbaren Energiequellen. Der Brennstoffzelle fällt in diesem Szenario eine bedeutende Rolle zu. In den Jahren 1993 bis 1998 hat die Heag Versorgungs-AG ein Brennstoffzellen-Heizkraftwerk (BZHKW) des amerikanischen Herstellers Onsi Corporation, Typ PC25A, betrieben. Die Verfasser geben einen Überblick über die Erfahrungen, die durch den Betrieb des BZHKW gemacht wurden, und schätzen ein, welche Rolle BZHKW künftig für Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) werden spielen können.

### SUMMARY

The authors sketch the structure of a future supply of electricity in Germany based on renewable energy sources. In this scenario the fuel cell overtakes an important role. In the years 1993 to 1998 the Heag Versorgungs-AG operated a fuel-cell power plant of the American manufacturer Onsi Corporation, Type PC25A. The authors give a brief overview of the experiences which were made through the operation of the fuel cell power plant and give their opinion about the future role of fuel cell power plants in energy supply companies.



Dipl.-Ing. **Josef Werum** (I.), Vorstand, und **Patrick Biehle**, Projektleiter, Heag NaturPur AG, Darmstadt.



Im Jahre 2001 betrug die Netto-Stromerzeugung in Deutschland insgesamt 491 TWh. Der in Deutschland produzierte Strom wird derzeit überwiegend aus fossilen und nuklearen Brennstoffen gewonnen. *Bild 1* stellt den Anteil der Energieträger an der Netto-Stromerzeugung der Stromversorgung im Jahr 2001 dar. Nur ein geringer Anteil (rd. 7 %) stammt aus erneuerbaren Energieträgern. Bei diesen dominiert die Wasserkraft mit rd. 55 % gefolgt von der Windkraft mit rd. 32 % (*Bild 2*). Biomasse (einschließlich Müll) hat hierbei einen Anteil von rd. 13 %. Die Photovoltaik hat trotz der immensen Zuwachsraten derzeit nur einen Anteil von rd. 0,1 %.

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das Mindestvergütungen für den eingespeisten Strom garantiert, verfolgt die Bundesregierung das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energieträger bis zum Jahr 2010 zu verdoppeln. Die erneuerbaren Energiequellen werden gefördert, nachdem man zu der Einsicht gekommen ist, dass die Verbrennung fossiler Energieträger wesentlich zum Anstieg der CO<sub>2</sub>-Belastung beiträgt (Treibhauseffekt) und dass die Vorkommen an fossilen und nuklearen Energieträgern nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen.

Die Heag NaturPur AG, Darmstadt, bietet als zertifizierter Ökostromversorger ihren Kunden seit Juli 1999 eine bilanziell zeitgleiche Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien an. Hier wird bereits die zukünftige Energieversorgung praktiziert.

Gemäß einer Untersuchung von *Kaltschmitt/Wiese* [1] aus dem Jahre 1993 sowie der Ergänzung mit aktuellen Daten [2] beträgt das technische Stromerzeugungspotenzial aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland im Jahr 2002 rd. 1 900 TWh/a (*Bild 3*). Das technische

Stromerzeugungspotenzial resultiert danach zu rd. 2 % aus der Wasserkraftnutzung, zu rd. 18,5 % aus der Windenergie, zu 16,8 % aus der Geothermienutzung, zu 10 % aus der Biomassenutzung und zu rd. 52,7 % aus der photovoltaischen Stromerzeugung.

Aus diesen Stromerzeugungspotenzialen könnte nach [3] ein zukünftiger deutscher Strommix wie folgt aussehen: 7,87 % Photovoltaik, 14,58 % Windenergie, 36,1 % Geothermie, 36,35 % Biomasse und rd. 5,1 % Wasserkraft (*Bild 4*).

Innerhalb dieser bereits wissenschaftlich nachgewiesenen Stromerzeugungspotenziale erneuerbarer Energieträger befindet sich u. a. ein großer Anteil von Biomasseheizkraftwerken bereits in Planung bzw. in Umsetzung. Projekte für Offshore-Windenergieanlagen und Geothermie-Kraftwerke zur Stromerzeugung (Hot-Dry-Rock-Verfahren mit OCR- bzw. Kalina-Prozess) sind ebenfalls in Planung.

Um eine sichere Stromversorgung auf Basis des oben genannten Strommixes zu gewährleisten, müsste aufgrund der zeitlichen Diskrepanz zwischen Stromerzeugung und Strombedarf – neben dem erheblichen Um- und Ausbau der elektrischen Verteilungsnetze – die elektrische Energie möglichst dann verbraucht werden, wenn sie erzeugt wird. Ein Energiemanagementsystem könnte hier direkt auf unterschiedlichste Verbrauchsgeräte (Industrie, Gewerbe und Haushalte) zugreifen und somit den Gleichzeitigkeitsfaktor deutlich erhöhen. Hierbei müssen die Verbrauchsgeräte jedoch für einen solchen Einsatz vorbereitet werden [4]. Die Industrie hat bereits intelligente busfähige Geräte entwickelt.

Der zweite Ansatz besteht in der Energiespeicherung. Zur Speicherung der elektrischen Energie könnte beispielsweise Wasserstoff, der durch Elektrolyse gewonnen wurde, verwendet werden. Der Wasserstoff könnte in die bestehenden Gasnetze eingespeist und in Großkraftwerken, z. B. GuD-Kraftwerken (zentrale Technologie), oder in Kleinstkraftwerken, z. B. Blockheizkraftwerken, Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen (dezentrale Technologien), verstromt werden.

Für den Um- und Ausbau der elektrischen Verteilungsnetze wären beachtliche finanzielle Mittel



notwendig. Dieser Prozess kann daher nur schrittweise über einen längeren Zeitraum umgesetzt werden. Brennstoffzellen-Heizkraftwerke (BZHKW) könnten in diesem Prozess eine Schlüsselfunktion übernehmen. Im ersten Schritt könnten Erdgas betriebene BZHKW als Mittel- und Spitzenlastkraftwerke in die bestehenden Kraftwerksparks eingebunden werden. Mit der Zunahme der Erzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energiequellen und der damit verbundenen fluktuierenden Stromeinspeisung könnten diese aufgrund ihres sehr guten transienten Verhaltens und der auch im Teillastbereich hohen Wirkungsgrade verstärkt Regelungsaufgaben übernehmen. Langfristig könnten BZHKW direkt mit Wasserstoff betrieben werden. Dass BZHKW bereits heute die technischen Anforderungen eines Elektrizitätsversorgungsunternehmens erfüllen, konnte bei dem Demonstrationsvorhaben »Hessische Brennstoffzelle« nachgewiesen werden.

#### Brennstoffzellen-Heizkraftwerk der Heag Versorgungs-AG

Von 1990 bis 1994 führte die Heag in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität (TU) Darmstadt das Demonstrationsvorhaben »Hessische Brennstoffzelle« [5] durch. Das Demonstrationsvorhaben hatte ein Finanzvolumen von rd. 1,4 Mio. €. Darin enthalten war der Erwerb und die Installation des BZHKW sowie die Durchführung eines wissenschaftlichen Begleitprogramms mit der TU Darmstadt. Die Hessische Landesregierung hat der Heag für das Vorhaben ein Zuschuss von rd. 0,7 Mio. € gewährt. Das Demonstrationsvorhaben wird bei der Hessischen Landesregierung unter dem Aktenzeichen VIC3b-78a-78-15/89-22 geführt.

Mit dem Demonstrationsvorhaben sollte nachgewiesen werden, dass die damals in Deutschland nicht kommerziell eingesetzte Brennstoffzellentechnologie im Normalbetrieb eines Blockheizkraftwerks funktionsfähig ist. Ziel war es, zur Marktvergrößerung und folglich zur Kostensenkung durch Herstellung größerer Fabrikationsserien beizutragen.

Ferner sollte mit dem Vorhaben demonstriert werden, dass eine einfache Vor-Ort-Montage, der hohe

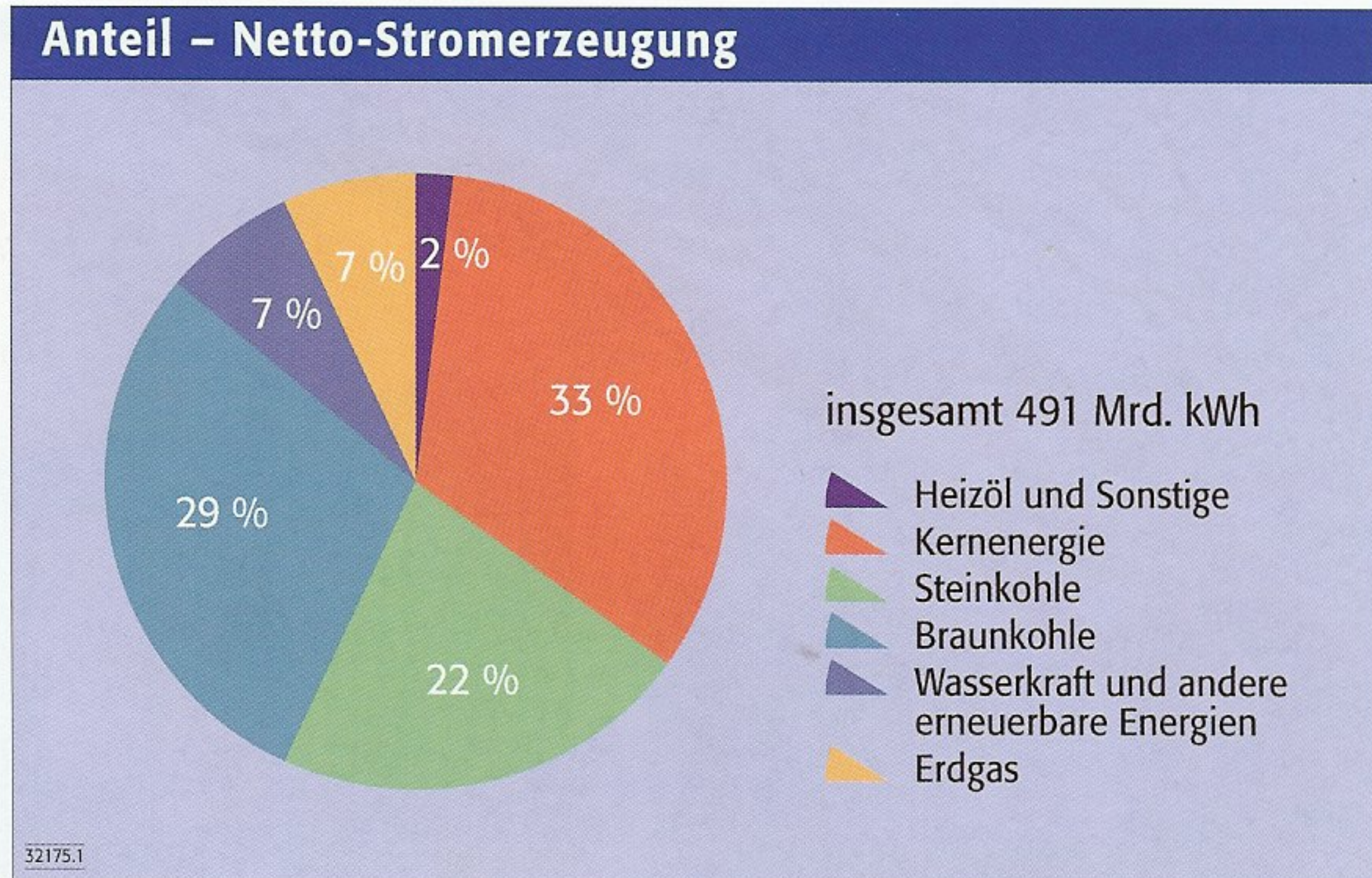


Bild 1. Anteil der Energieträger an der Netto-Stromerzeugung der Stromversorger 2001

Quelle: Strommarkt Deutschland, VDEW

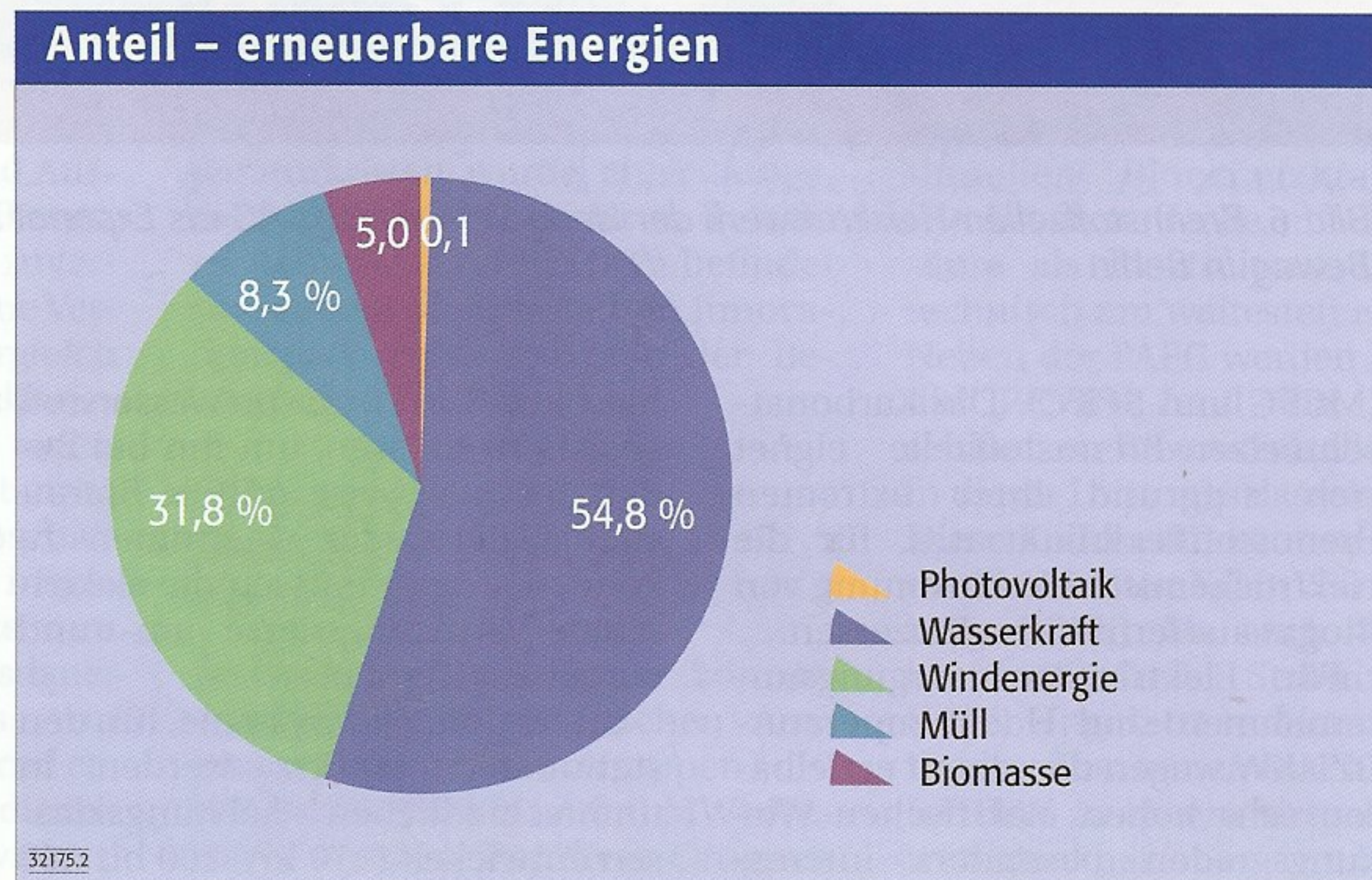


Bild 2. Anteil der Energieträger aus erneuerbaren Energien an der Netto-Stromerzeugung 2001

Quelle: Strommarkt Deutschland, VDEW

elektrische und thermische Wirkungsgrad der Erzeugungsanlage, die äußerst geringen Emissionen und die vollautomatisierte Betriebsweise diese Technologie für einen breitgestreuten Einsatz prädestinieren und damit die Brennstoffzellen-Technik als integraler Bestandteil eines zukünftigen dezentralen Energieversorgungssystems zu betrachten ist.

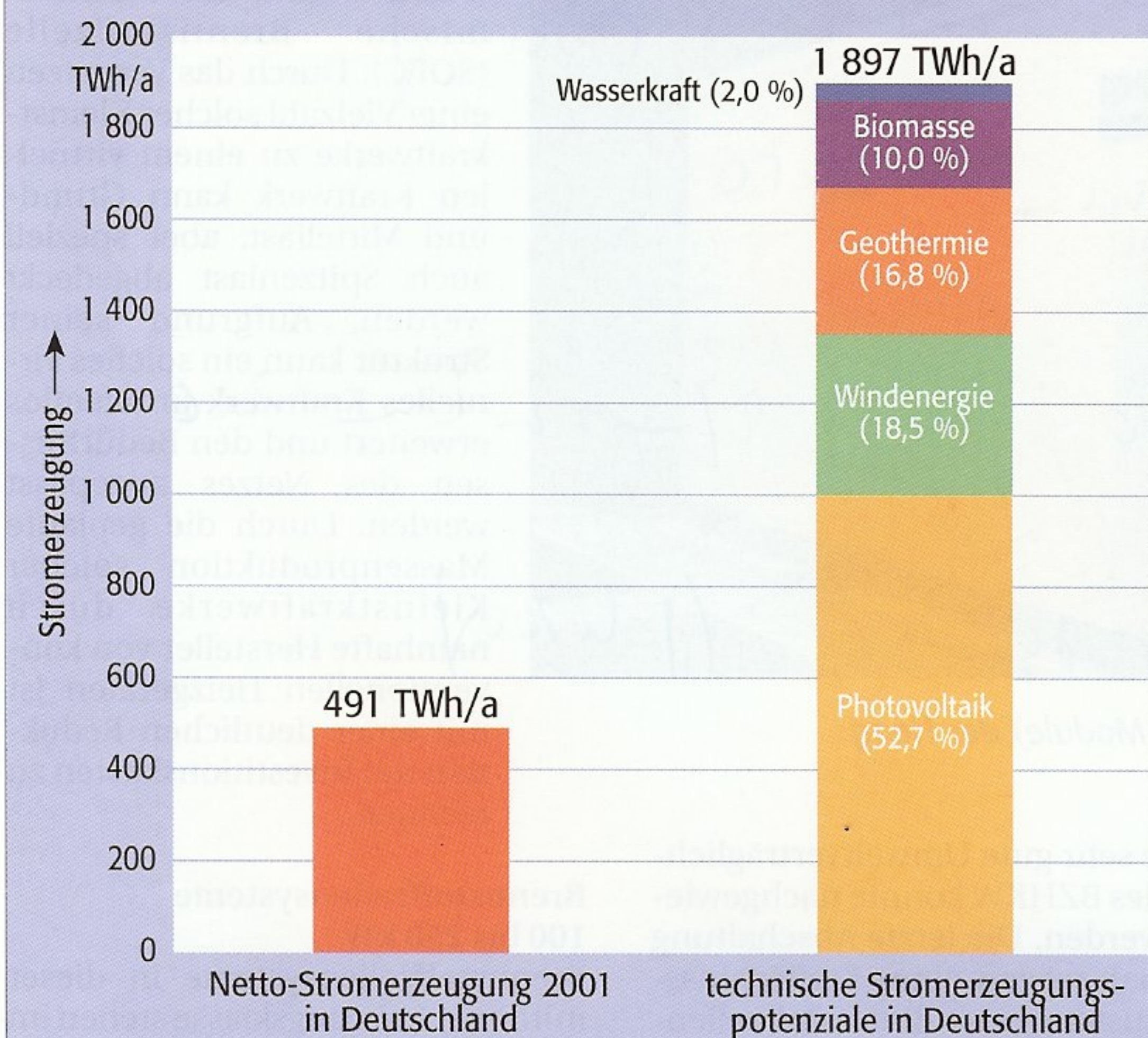
Das BZHKW (Bild 5) wurde im April 1993 geliefert und konnte Ende Juni 1993 in Betrieb genommen werden. Im Rahmen des Demonstrationsvorhabens wurde in Zu-

sammenarbeit mit der TU Darmstadt ein wissenschaftliches Experimentalprogramm entwickelt, um u. a. folgende Punkte zu untersuchen:

- Nachweis der Wirkungsgrade der Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung
- Dokumentation des Betriebsverhaltens bei Volllast, Teillast und wärmegeführtem Betrieb
- Dokumentation des transienten Betriebsverhaltens (Dynamik der Leistungsbereitstellung, Kurzschluss, Lastwegfall usw.)
- Vergleich des Betriebsverhaltens bei elektrischem Netzparallelbe-



## Stromerzeugungspotenziale



32175.3

Bild 3. Technische Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien in Deutschland

Quelle: Kaltschmitt/Wiese

trieb mit dem Betriebsverhalten bei elektrischem Inselbetrieb

- Dokumentation der Emissionen
- Analyse der Randbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb des BZHKW.

Es konnte dokumentiert werden, dass das elektrische Verhalten des BZHKW allen betrieblichen Anforderungen, die vom öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetz gestellt werden, entspricht. Die ge-

messenen Emissionen waren bei allen Betriebsbedingungen deutlich niedriger als bei vergleichbaren konventionellen Kraftwerken. Die sehr hohen Wirkungsgrade konnten ebenfalls dokumentiert werden. Es wurde aber auch nachgewiesen, dass die Investitionskosten deutlich sinken müssen, damit BZHKW des Typs Onsi PC25 wirtschaftlich betrieben werden können.

Im Anschluss an das Demonstrationsvorhaben wurde von 1994 bis 1997 das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben »Alterungsprozesse des Brennstoffzellen-Heizkraftwerks Onsi PC25« [6] durchgeführt. Auch die Kosten dieses vierjährigen Vorhabens in Höhe von rd. 35 000 € wurden von der Hessischen Landesregierung (Aktenzeichen VIC3b-78a78-15/94-40) mit rd. 50 % bezuschusst. Die Untersuchungen konzentrierten sich u. a. auf folgende Punkte:

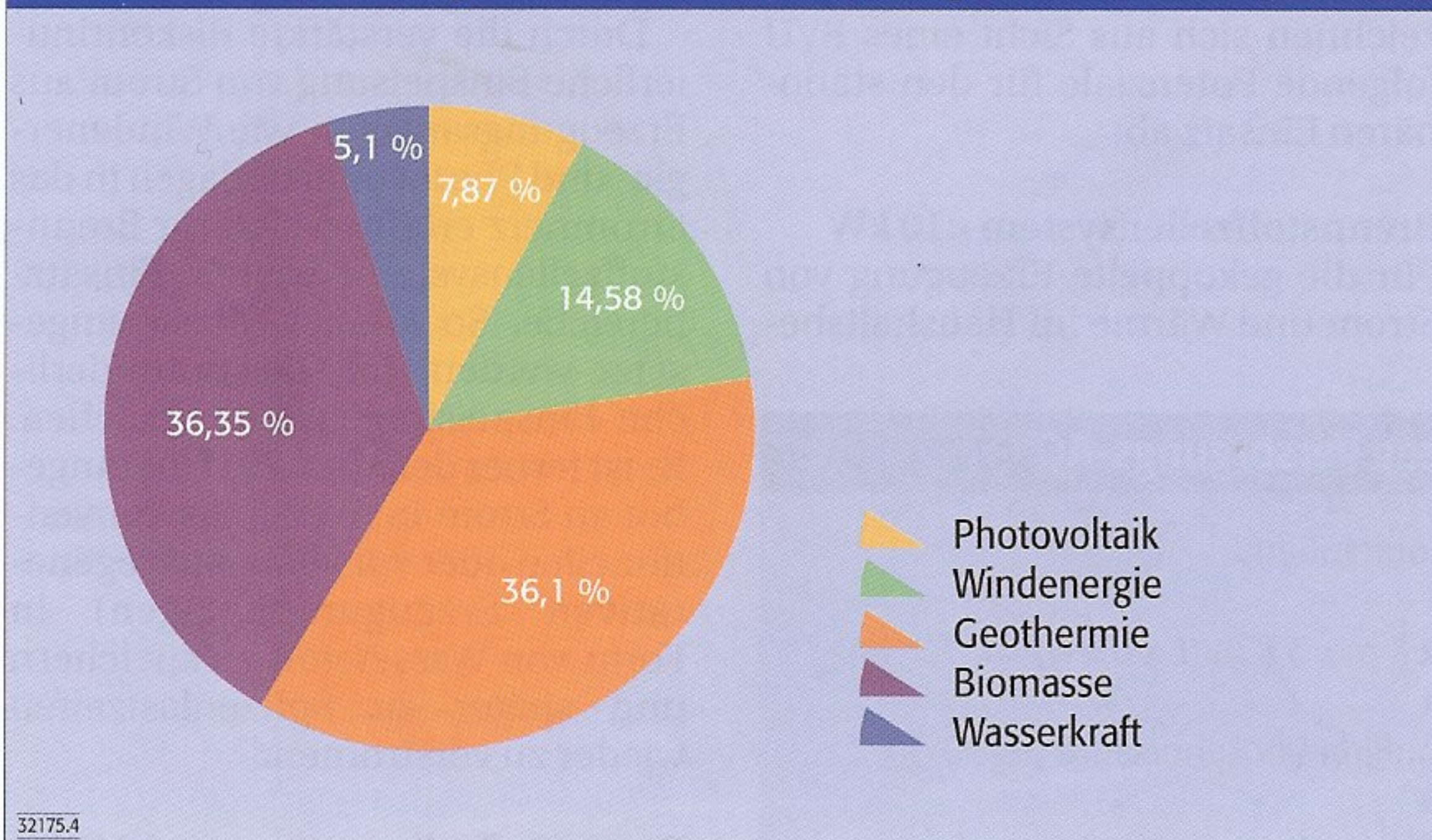
- Dokumentation der Emissionen des BZHKW
- Ermittlung eventueller Korrelationen zwischen dem Phosphorsäureverlust und der Entwicklung der Wirkungsgrade
- Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrades sowie der Brennstoffzellenstapel-Spannung abhängig von der Betriebsdauer im Anschluss an die Beendigung des Demonstrationsvorhabens »Hessische Brennstoffzelle«.

Die Abgasemissionen sind mit zunehmender Betriebsdauer gestiegen ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_x$ ) bzw. gleichgeblieben ( $\text{NO}_x$ ). Auch nach einer Betriebsdauer von rd. 33 000 h wurden die Grenzwerte der TA Luft deutlich unterschritten. Die sehr gute Umweltverträglichkeit war somit auch am Ende des Vorhabens gegeben.

Der Phosphorsäureverlust des Brennstoffzellenstapels konnte mit rd. 13 kg nach 33 000 Betriebsstunden ermittelt werden. Obwohl die ursprünglich im Brennstoffzellenstapel enthaltene Menge an Phosphorsäure nicht bekannt ist, war erkennbar, dass der Verlust an Phosphorsäure bald einen kritischen Wert erreicht haben dürfte.

Der elektrische Wirkungsgrad und die Brennstoffzellenstapel-Spannung nahmen über die gesamte Betriebsdauer ab. Die maximale elektrische Ausgangsleistung betrug aufgrund der gesunkenen Spannung des Brennstoffzellenstapels am Ende des Vorhabens 160 kW.

## Zusammensetzung – erneuerbare Energien



32175.4

Bild 4. Mögliche Zusammensetzung an der Netto-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Quelle: Daten u. a. nach Kaltschmitt/Wiese/Streicher



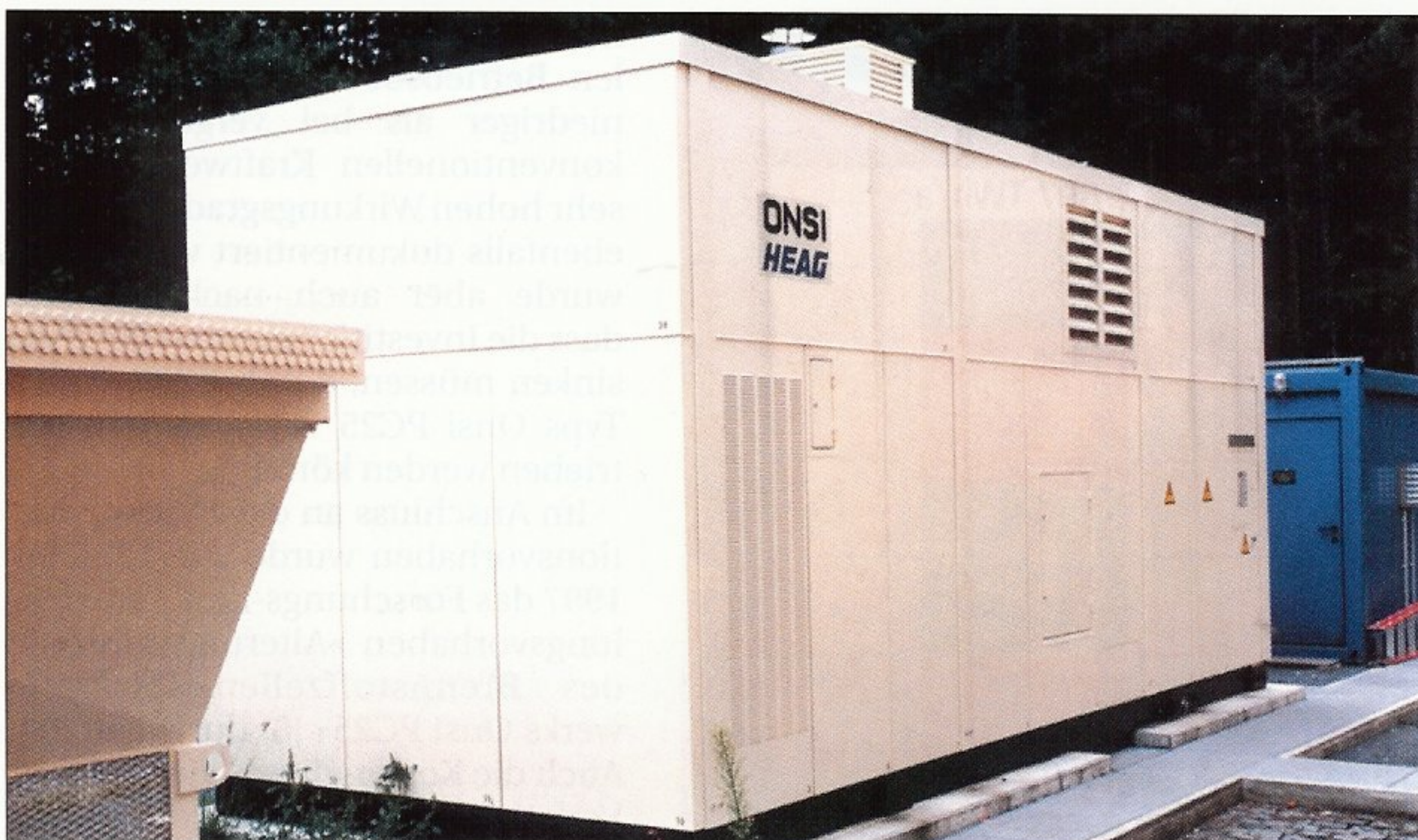


Bild 5. Brennstoffzellen-Heizkraftwerk (Power Module) der Heag Versorgungs-AG

### Ergebnis des Projektes

Das BZHKW der Heag Versorgungs-AG war vom 29. Juni 1993 bis zum 28. April 1998 in Betrieb. Es stellte sich heraus, dass es aufgrund der sorgfältigen Konstruktion und Auslegung der Gasprozess- und Brennstoffzelleneinheit sowie der zuverlässigen Prozessleittechnik eine Verfügbarkeit aufwies, die den Vergleich mit konventionellen Blockheizkraftwerken nicht scheuen muss. Die Verfügbarkeit der Anlage betrug zum Zeitpunkt der letzten Abschaltung 88,7 %. Das BZHKW war insgesamt 37 606 h in Betrieb. Die vom Hersteller genannte Lebensdauer des Brennstoffzellenstapels von 40 000 h wurde somit annähernd erreicht. Allerdings haben sich die Investitionskosten nicht so entwickelt, wie es vom Hersteller prognostiziert wurde. Anfang der neunziger Jahre wurde ein anvisierter Verkaufspreis von 300 000 \$ für das Jahr 1998 genannt. Der Verkaufspreis lag zum Zeitpunkt der letzten Abschaltung jedoch bei rd. 600 000 \$.

Die sehr gute Umweltverträglichkeit des BZHKW konnte nachgewiesen werden. Die letzte Abschaltung geschah wegen eines Kurzschluss-Fehlzustandes im Brennstoffzellenstapel. Aufgrund der sehr hohen Reparaturkosten wurde entschieden, die Anlage nicht wieder in Betrieb zu nehmen. Das BZHKW befindet sich zurzeit als Exponat im Innovationspark Brennstoffzelle der Bewag in Berlin (Bild 6).

### Perspektiven für den Brennstoffzelleneinsatz aus Sicht eines EVU

Brennstoffzellensysteme können aufgrund ihrer elektrischen Ausgangsleistung in drei Gruppen (<10 kW, 100 bis 250 kW und >1 MW) eingeteilt werden. Für diese Gruppen zeichnen sich aus Sicht eines EVU folgende Potenziale für den stationären Einsatz ab:

#### Brennstoffzellensystem <10 kW

Für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme im Haushaltsbe-

reich eignen sich die Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) und die Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC). Durch das Vernetzen einer Vielzahl solcher Kleinstkraftwerke zu einem virtuellen Kraftwerk kann Grund- und Mittellast, aber speziell auch Spitzenlast abgedeckt werden. Aufgrund seiner Struktur kann ein solches virtuelles Kraftwerk problemlos erweitert und den Bedürfnissen des Netzes angepasst werden. Durch die geplante Massenproduktion solcher Kleinstkraftwerke durch namhafte Hersteller von konventionellen Heizgeräten ist mit einer deutlichen Reduktion der Investitionskosten zu rechnen.

### Brennstoffzellensysteme 100 bis 250 kW

Brennstoffzellensysteme in dieser mittleren Leistungsklasse stehen im direkten Wettbewerb mit konventionellen Blockheizkraftwerken. Die Brennstoffzelle mit Phosphorsäure als Elektrolyten (PAFC) ist technisch am weitesten entwickelt. Neben der PAFC werden die SOFC, die PEMFC und die Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle (MCFC) in dieser Leistungsklasse entwickelt. Diese Kraftwerke können sowohl in der klassischen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als auch als unterbrechungsfreie Stromversorger (USV) eingesetzt werden. Auch hier ist das Zusammenfassen mehrerer BZHKW zu einem virtuellen Kraftwerk denkbar.

Durch die verstärkte diskontinuierliche Einspeisung von Strom aus Erzeugungsanlagen wie Windenergie- und Photovoltaikanlagen in das Stromnetz eröffnen sich für Brennstoffzellensysteme weitere Einsatzbereiche. So können diese eingesetzt werden, um diskontinuierliche Einspeisungen auszugleichen. Es ist ferner denkbar, ein Überangebot an Strom im Netz (aus konventionellen oder vor allem aus regenerativen Erzeugungsanlagen) in Form von Wasserstoff zu speichern und später zu Spitzenlastzeiten wieder zu verstromen.

### Brennstoffzellensysteme > 1 MW

Für BZHKW mit elektrischen Ausgangsleistungen >1 MW eignen sich die Hochtemperatur-BZHKW

### Technische Daten des BZHKW der Heag Versorgungs-AG

Hersteller	Onsi Corporation
Bezeichnung	PC25A
Maße	7,3 m x 3 m x 3,5 m (L x B x H)
Gewicht	rd. 27 t
Elektrolyt	konzentrierte Phosphorsäure (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )
elektrische Ausgangsleistung	200 kW
thermische Ausgangsleistung	220 kW
elektrischer Wirkungsgrad	40 %
thermischer Wirkungsgrad	45 %



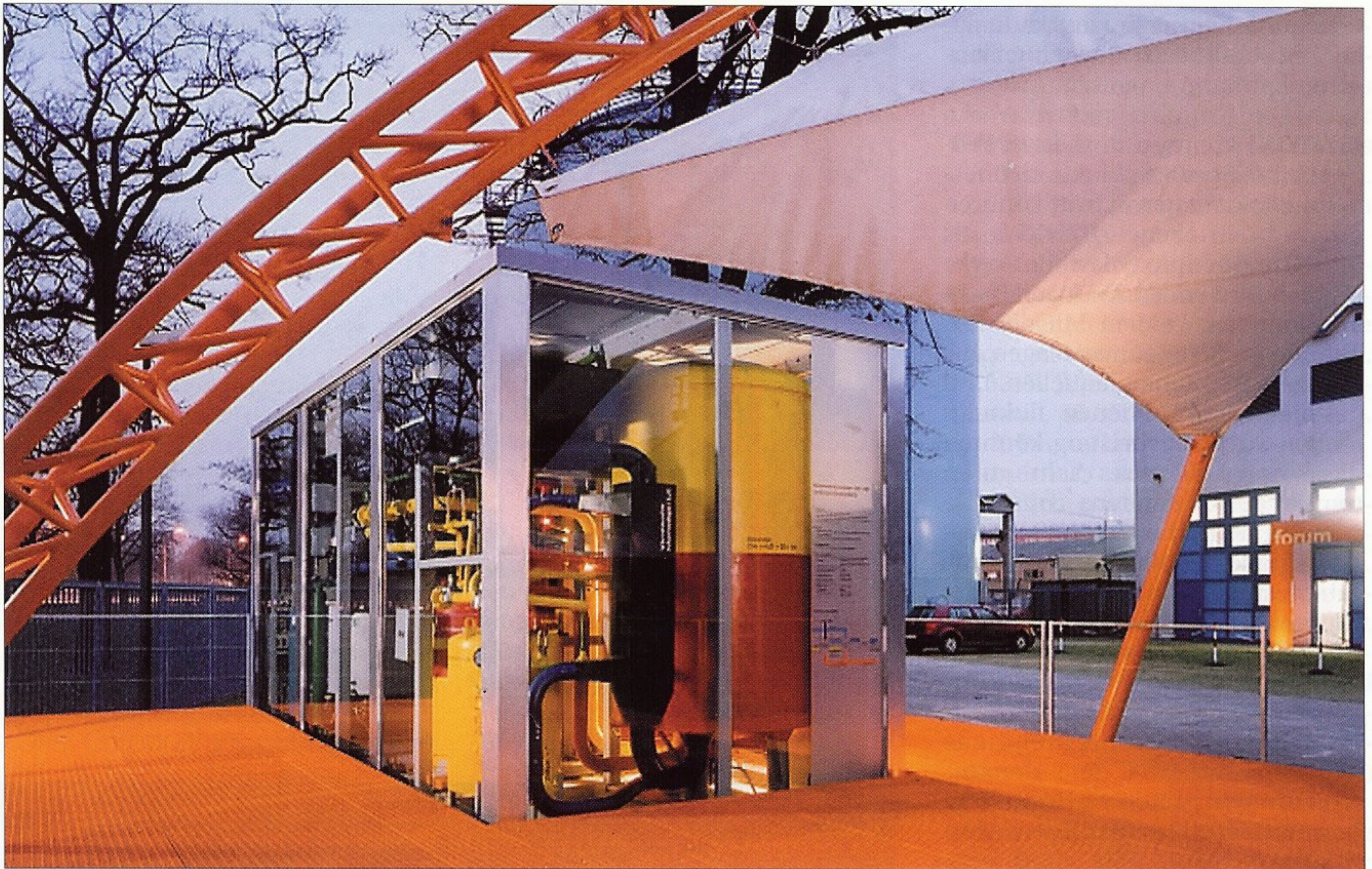


Bild 6. Brennstoffzellen-Heizkraftwerk der Heag Versorgungs-AG als Exponat im Innovationspark Brennstoffzelle der Bewag in Berlin

(MCFC und SOFC). Die Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle eignet sich aufgrund ihrer extremen Brennstoffflexibilität u. a. für die elektrochemische Verstromung von Biogas aus fermentativen Prozessen.

Für Elektrizitätsversorgungsunternehmen sind Hochtemperatur-BZHKW wegen den damit erzielbaren sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden besonders interessant. Diese Kraftwerke können gut als Mittel- und Grundlastkraftwerke eingesetzt werden.

### Resümee und Ausblick

Die in Deutschland vorhandenen technischen Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energiequellen reichen aus, um die Stromversorgung in Deutschland zu gewährleisten. Um eine zuverlässige Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energiequellen sicherzustellen, muss die zeitliche Diskrepanz zwischen Stromerzeugung und Verbrauch durch intelligentes Energiemanagement sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf der Verbraucherseite minimiert werden. Überschuss-Strom wird man

hierbei z. B. in Form von Wasserstoff speichern müssen, um ihn bei Bedarf beispielsweise mittels Brennstoffzellen wieder verstromen zu können. Ferner müssen die elektrischen Verteilungsnetze um- und ausgebaut werden.

Brennstoffzellensysteme für den stationären Einsatz werden in unterschiedlichen Leistungsklassen entwickelt (<10 kW, 100 bis 250 kW und >1 MW). Ihre Funktionalität und Zuverlässigkeit haben Brennstoffzellensysteme bei verschiedenen Demonstrationsvorhaben, z. B. »Hessische Brennstoffzelle«, bewiesen. Damit sich solche Systeme in der Energiewirtschaft durchsetzen können, ist grundsätzlich eine deutliche Senkung der Investitionskosten, wie von den Herstellern prognostiziert, notwendig. In einer zukünftigen auf erneuerbaren Energieträgern und Wasserstoff beruhenden Energiewirtschaft kann den Brennstoffzellensystemen eine Schlüsselfunktion zukommen.

### SCHRIFTTUM

- [1] Kaltschmitt, M.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energieträger in Deutschland, Potentiale und Kosten. Springer Verlag, Heidelberg, 1993.
- [2] Kaltschmitt, M.: Geothermische Stromerzeugung in Deutschland – Projekte und energiewirtschaftliche Einordnung. VWEW Infotag »Geothermie – Möglichkeiten und Strategien in Deutschland und speziell in Rheinland-Pfalz«, 21. November 2002, Bad Dürkheim.
- [3] Kaltschmitt, M.; Wiese, A.; Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer Verlag, Heidelberg, 2003.
- [4] Werum, J.: Optimierter Einsatz erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung charakteristischer Haushaltsgeräte. Diplomarbeit FHW Wiesbaden, Februar 1994.
- [5] Hessische Elektrizitäts-AG, Schlussbericht »Demonstrationsvorhaben« Energieversorgung mit einem Brennstoffzellen-Heizkraftwerk mit 200 kW elektrischer Leistung, Darmstadt, Mai 1994.
- [6] Heag Versorgungs-AG, Schlussbericht »Forschungs- und Entwicklungsvorhaben« Alterungsprozesse des Brennstoffzellen-Heizkraftwerks Onsi PC25, Darmstadt, Januar 1998.

(32175)