

EINLEITUNG

aber es erscheint sinnvoll, drei Module aufzuzeigen, mit denen durch Kombination von Elementen in unterschiedlicher Art und Weise auf eine große Bandbreite veränderter Rahmenbedingungen reagiert werden könnte.

Der Zweck dieser Extremszenarien (regenerativ, fossil, nuklear) besteht darin, den möglichen Handlungsspielraum in den jeweiligen Feldern bis hin zu extremen Anforderungen abzudecken und die damit verbundenen Forschungsanforderungen möglichst genau herauszuarbeiten. Es ist dann die Aufgabe der Politik festzulegen, wie viel davon umgesetzt werden soll, um über die ohnehin notwendigen Maßnahmen (No Regret-) hinaus flexibel auf Änderungen der Rahmenbedingungen und Annahmen reagieren zu können. Nochmals sei an dieser Stelle allerdings betont, dass Ener-

gieforschung wesentlich breiter angelegt sein muss als die jeweilige Energiepolitik, um möglichst viele Optionen für die Zukunft offenzuhalten.

Im vierten Kapitel werden wissenschaftliche Querschnittsthemen beschrieben, die bearbeitet werden müssen, um den Übergang zu einer Gesellschaft mit langfristig gesicherter, nachhaltiger Energiewirtschaft vorzubereiten. Aus den Ausführungen der Kernkapitel zwei, drei und vier werden in Kapitel fünf strukturelle Empfehlungen zu Fragen der Infrastruktur, der Forschungsförderung, der Forschungsorganisation und der Nachwuchsförderung gegeben.

Es schließt sich ein Ausblick als sechstes Kapitel an.

II No Regret-Forschungsschwerpunkte

Einleitung

Eine Reihe von Energieforschungsfeldern muss unabhängig von den gewählten Technologie-schwerpunkten in jedem Falle – und im Wortsinn „ohne Bedauern“ – aus den weiter oben skizzierten Gründen mit höchster Priorität verfolgt werden.

Effizienzmaßnahmen bergen ein großes Potenzial und sind durch einen hohen Grad an Kompatibilität gekennzeichnet, da sie für alle Bereitstellungsoptionen gelten bzw. neue ermöglichen. Effizienzoptionen decken bereits heute einen weiten Bereich der Energieforschung ab. Sie reichen von der Wirkungsgradsteigerung bei der Wandlung von Primärenergie in nutzbare Energie – z. B. bei Gasturbinen oder photovoltaischen Elementen – über die Absenkung von Verteilungsverlusten bei der Übertragung von elektrischer Energie durch Etablierung von Hochspannungs-Gleichstromleitungen für längere Transportentfernungen bis zur Anwendung durch Nutzer in Industrie und privaten Haushalten oder zu der energieeffizienten Sanierung von Gebäuden.

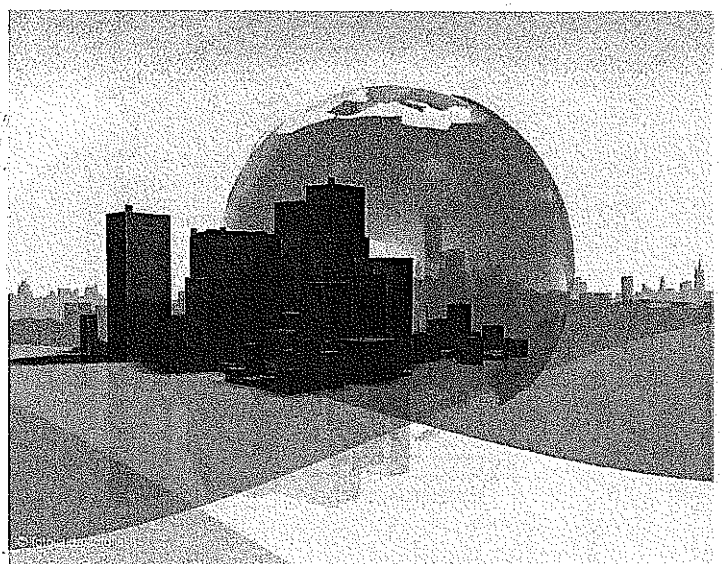
Die Energienutzung wird sich in Zukunft zunehmend in Richtung der elektrischen Energie verschieben, da die meisten Bereitstellungstechnologien, die fossile Energiequellen ersetzen können, primär elektrische Energie liefern und weitere Umwandlungen grundsätzlich mit Verlusten verbunden sind. Die elektrische Energie kann insofern als höchstwertige Form betrachtet werden, als sie in ihrer Anwendung die größte Flexibilität bietet. Aus ihr kann ohne großen Aufwand und mit hoher Effektivität jede andere Energieform bereitgestellt werden (Wärme, Licht, Bewegung usw.). Man spricht deshalb bereits heute vom Ziel einer All Electrical Society, einer weitgehend elektrifizierten Gesellschaft – ein Ziel, das auch für Deutschland von Relevanz ist. Als Konsequenz ergibt sich daraus zwangsläufig, dass ein zukünftiges Energiesystem sich auf elektrische Netze, Speicher und Umwandlungstechnologien stützen wird, mit de-

ren Hilfe aus elektrischer Energie unmittelbar die jeweils benötigte Nutzenergie gewonnen wird.

Die energieeffiziente Stadt als integrativer Forschungsansatz

Die Hälfte der Weltbevölkerung lebt in Städten, und dieser Anteil wird in den nächsten Jahrzehnten weiter stark wachsen. Es ist daher von zentraler Bedeutung, Visionen einer nachhaltigen Stadtinfrastruktur zu entwickeln, welche die Bevölkerungskonzentration zu einer Steigerung der Energieeffizienz zu nutzen helfen. Für die Forschung stellen sich dazu zahlreiche Fragen: Wie kann die Raumanordnung nachhaltiger Städte aussehen und was ist ihre optimale Größe? Welchen Beitrag können sie zur Verringerung des Energieverbrauchs und des Treibhausgasausstoßes beitragen? Auf welche Weise kann dies geschehen? Welche Technologien benötigen wir dazu? In welchem Maß können Städte als Innovationszentren und Labors einer nachhaltigen Zukunft fungieren?

Wenn diese Fragen beantwortet werden sollen, treten zwei Sektoren besonders in der Vorder-



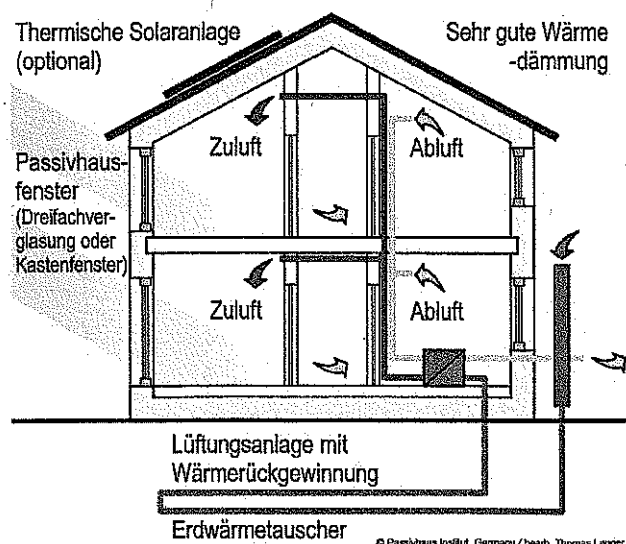
grund: die Gebäude und der Verkehr. Mit 33,5 % Gesamtanteil verbraucht der Gebäudebereich für die Energiedienstleistungen Raumwärme, Warmwasser und Beleuchtung den größten einzelnen Anteil der Endenergie in Deutschland. Wenn man bedenkt, dass 80 % aller Haushalte nicht auf dem neuesten Stand der Technik sind, besteht offensichtlich ein hohes Energiesparpotenzial. Der gesamte Verkehrssektor benötigt einen ähnlichen Anteil der Endenergie wie der private Sektor (siehe oben, Abbildung 4); allerdings liegt in diesem Bereich das rein technologische Sparpotenzial vermutlich niedriger. Verbunden mit diesen beiden Sektoren, die für die Erhöhung der Energieeffizienz von Städten besonders wichtig sind, müssen auch die Versorgungsnetze und – wo nötig – Speicher so weiterentwickelt werden, dass sie neue Angebots- und Nachfragestrukturen bedienen können. Diese drei Forschungsthemen entfalten ihre größte Wirkung zwar in der Anwendung auf Ballungsräume, sie sind aber vielfach auch für ländliche Regionen relevant.

Gebäude

Im Gebäudesektor könnten bereits heute ohne weitere Technologieentwicklung große Einsparpotenziale realisiert werden; vielfach scheitert dies aber an der **Umsetzung**. Ihre Erforschung er-

fordert neben ökonomischen insbesondere **verhaltenswissenschaftliche Ansätze**. Fassaden könnten besser isoliert werden; anstelle veralteter Heizungsanlagen könnten moderne, energiesparende Systeme eingebaut werden, Energiesparlampen könnten weitgehend die bisherigen Glühlampen ersetzen, Kraft-Wärme-Kopplung unter Einsatz von Nah- und Fernwärmenetzen würden die Gesamteffizienz der Systeme verbessern. Viele dieser Maßnahmen sind auf längere Sicht unter ökonomischen Gesichtspunkten besonders sinnvoll. Technologische Weiterentwicklungen erscheinen hier zum Teil nicht unmittelbar vordringlich, doch gibt es erheblichen Forschungsbedarf zur Frage einer besseren Umsetzung. Was sind die richtigen Anreizsysteme? Welche ökonomischen, rechtlichen und politischen Steuerungsinstrumente können dafür sorgen, die technischen Möglichkeiten auch auszureizen? In welcher Weise beeinflussen psychologische, kulturelle und institutionelle Kontextbedingungen die Geschwindigkeit, mit der Innovationen umgesetzt werden? Diese **Ziel- und Instrumentenwirkungsforschung** ist auch über das Problemfeld „energieeffiziente Stadt“ hinaus ein Thema, das dringend intensiver bearbeitet werden muss.

Gleichzeitig gibt es auch im Bereich der energieeffizienten Gebäude weiterhin technologisch geprägten Forschungsbedarf. Es müssen **architektonische und gebäudetechnische Konzepte** entwickelt werden, die den Heizwärmebedarf – und zunehmend auch den Kühlungsbedarf – von Wohngebäuden stark zurückdrängen und vom Verbraucher akzeptiert werden. Bei Gebäuden mit niedrigerem Wärmebedarf könnten sich andere als die jetzigen Heizkonzepte durchsetzen, um den dann noch vorhandenen Restenergiebedarf zu decken, insbesondere in Verbindung mit **leistungsfähiger Sensorik**. Hier ist über Lebenszyklusanalysen zu untersuchen, welche Heiztechnologien am günstigsten sind. In einer zunehmend elektrifizierten Energieinfrastruktur könnten dies Wärmepumpen oder die dynamische Flächenheizung auf Elektrobasis ein. Derartige Systeme sollten besonders in den Schwerpunkt von Forschungsaktivitäten zur Effizienzverbesserung rücken. Heute ist die Bereitstellung von **elektrischer Energie für Heizungsanwendungen** zwar aufgrund des



Schematische Darstellung eines Passivhauses

niedrigen durchschnittlichen Wirkungsgrades des Kraftwerkparks mit relativ hohen Verlusten verbunden. Fortschritte bei der Kraft-Wärme-Kopplung und zunehmende Anteile regenerativer Energien bei der Bereitstellung elektrischer Energie werden dieses Verhältnis jedoch verbessern, sodass die Nutzung elektrischer Energie für die Bereitstellung des Restwärmebedarfs akzeptabel oder sogar systemisch vorteilhaft werden kann.

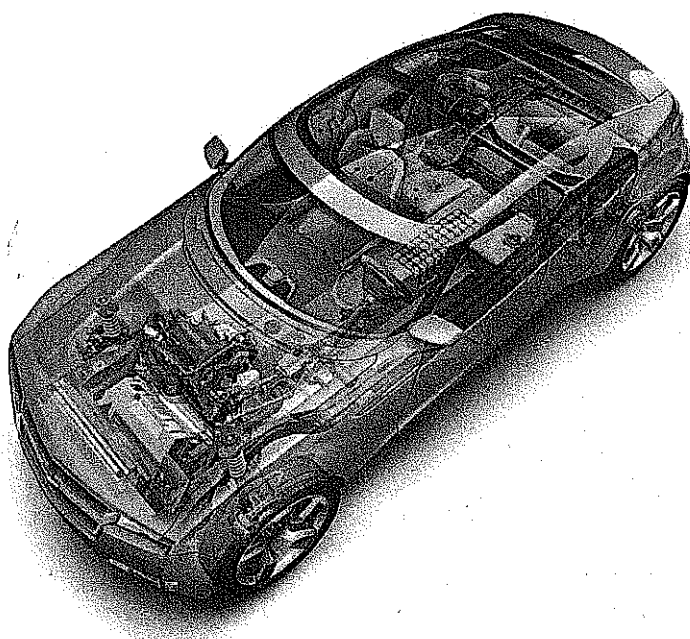
Straßengebundene Mobilität

Der Verkehr wird in Deutschland – und weltweit – in den nächsten Jahren deutlich ansteigen. Von diesem Anstieg sind insbesondere die Ballungsräume als Kerne der Wirtschaftsentwicklung und der individuellen Mobilität betroffen. Ein konzentrierter Forschungsansatz zur Verkehrsproblematik ist also für die Realisierung energieeffizienter Städte wichtig. Dazu kommt die Forderung, CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zu senken. Während in Kraftwerken und anderen konzentrierten CO₂-Quellen die Abscheidung an der Quelle zumindest grundsätzlich möglich scheint, ist dies bei verteilten, jeweils kleinen Quellen wie Autos kaum vorstellbar. Hier sind dringend Lösungen erforderlich.

Beim straßengebundenen Verkehr besteht die besondere Herausforderung darin, dass dieser momentan und vermutlich auch für die nächsten zwei bis drei Dekaden überwiegend auf den Einsatz flüssiger Energieträger in Verbrennungsmotoren angewiesen sein wird. Gleichwohl gibt es zu einer weitgehenden Entkarbonisierung dieses Teils des Transportsektors keine klimafreundliche Alternative. Klassische Verbrennungsmotoren weisen nach wie vor große **Verbrauchsoptimierungspotenziale** auf (PKW-Otto: ca. 35 %; PKW-Diesel: ca. 20 %), wobei zukünftige Motorentwicklungen auch zu einer Konvergenz der Diesel- und Otto-Technologie führen können. Hier ist auch ein enges Zusammenwirken entlang der Prozesskette **Kraftstoffherstellung – Verbrennung im Motor – Abgasbehandlung** ein unverzichtbares Element. Eine nachhaltige Lösung bezüglich des CO₂-Problems für Verbrennungsmotoren erscheint nur durch zunehmende **Kraftstoffdiversifizierung** insbesondere zugunsten

von Bio-Kraftstoffen (allerdings nur der 2. und 3. Generation) möglich, mit dem damit verbundenen Forschungsbedarf hinsichtlich der Technologieentwicklung und der systemischen Aspekte, wie etwa der Nutzungskonkurrenz zu anderen Energie- und Rohstofftechnologien, die auf Biomasse zugreifen. Forschung zu Veränderungen des Verbraucherverhaltens (etwa Verzicht auf Fahrzeuge mit hoher Beschleunigungsleistung oder benzinsparendes Fahrverhalten) können die Aktivitäten zur Effizienzverbesserung auf der Angebotsseite auch von der Nachfrageseite unterstützen.

Angesichts der oben erwähnten Entwicklung hin zu einer weitgehend elektrifizierten Gesellschaft und der Erwartung, dass unabhängig von der Energiebereitstellungstechnologie, die Mobilität zunehmend elektrisch gewährleistet werden muss, ist Forschung zu Konzepten zur Realisierung von **E-Mobilität** (Elektrohybrid bis E-Fahrzeug) und zur Sicherstellung einer entsprechenden Versorgungsinfrastruktur von besonderer Bedeutung. Dass sich energieeffiziente Städte als primäre Zielrichtung solcher Konzepte besonders gut eignen, liegt auf der Hand. Da die Umwandlung von elektrischer Energie in einen stofflichen Speicher und dann wieder zurück in elektrische



Elektroauto Chevrolet Volt (Bildquelle: General Motors)

Energie mit erheblichen Verlusten über die gesamte Prozesskette hinweg belastet ist (derzeit muss mit 75 % Verlust gerechnet werden), sollten sich Forschungsanstrengungen **primär auf Batterie-konzepte** zur Realisierung von Elektrofahrzeugen richten. Diese Technologie wird unabhängig von den Randbedingungen benötigt und eignet sich – aufgrund der limitierten Reichweiten, die für Batteriefahrzeuge auf absehbare Frist erwartet werden – besonders für Ballungsräume. Forschungskonzepte sollten nicht bei der derzeit diskutierten Lithium-Ionenbatterie stehen bleiben, sondern auch **Systeme zukünftiger Batteriegenerationen** einschließen. Schließlich besteht großer Forschungsbedarf zur Frage **integrierter Mobilitätskonzepte**. Dabei geht es beispielsweise um die optimale Kombination von privaten und öffentlichen Transportmitteln und die gemeinschaftliche Nutzung von Fahrzeugen (Car Sharing, Fahrgemeinschaften, Car Pools). Auch städtebauliche Aspekte wie die „Stadt der kurzen Wege“ können Bestandteil integrierter Mobilitätskonzepte sein. Dabei sind technische, organisatorische und psychologische Aspekte eng miteinander verbunden.

Netze und Speicher

Die Entwicklungen im Bereich der energetischen Gebäudeversorgung und der elektrifizierten Mobilität sind im Zusammenhang mit dem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien, insbesondere der Windenergie, in der Strombereitstellung zu sehen. Sie bedingen intensive Forschungsanstrengungen im Bereich der **elektrischen Netze und von Speichertechnologien**. Auch hier handelt es sich eindeutig um No Regret-Maßnahmen, da die erwartete verstärkte Elektrifizierung eine Anpassung, wahrscheinlich aber eine umfassende Neukonstruktion unserer Netzinfrastruktur unabdingbar macht.

Daher muss die Energieforschung auf alle Optionen gerichtet werden, die die Speicherbarkeit oder die stoffliche Nutzung von elektrischer Energie massiv verbessern und die dazu beitragen können, die bisherigen **Netzstrukturen in einem wesentlich komplexeren und dynamischen Umfang zu verstehen** und zu beherrschen. Die zu schaffenden Netzstrukturen müssen künftig

