

# Smart City – Bausteine auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>-armen Stadt

Stefan Lechtenböhrer, Dieter Seifried, Claus Barthel, Susanne Böhler, Rüdiger Hofmann, Kora Kristof, Frank Merten, Frederic Rudolph, Clemens Schneider und Dietmar Schüwer

*Die Städte tragen weltweit am stärksten zum Klimawandel bei. Wer mit dem Klimaschutz ernst machen will, muss also dort ansetzen. Eine Metropole in einen weitgehend CO<sub>2</sub>-freien Ballungsraum umzuwandeln, ist eine sehr anspruchsvolle, aber machbare Aufgabe, die natürlich nicht umsonst zu haben ist, sich im Großen und Ganzen aber rechnet. Wie eine aktuelle Studie zeigt, lässt sich die weitgehende CO<sub>2</sub>-Freiheit aber nur realisieren, wenn der gesamte Entwicklungsprozess der urbanen Infrastrukturen in die Stadt-, Gebäude-, Verkehrs- und Energieplanung sowie in die Investitionsentscheidungen der privaten Akteure vorrangig integriert wird. Und wenn alle mitziehen: Verwaltungen, Stadtplaner, Energieversorger und der Bürger.*

Urbane Metropolregionen können in den nächsten Jahrzehnten den Weg in eine annähernd CO<sub>2</sub>-freie Zukunft einschlagen. Das ist ein Ergebnis einer jüngst veröffentlichten Studie des Wuppertal Instituts [1], die modellhaft für die Stadt München mit ihren 1,3 Mio. Einwohnern durchgeführt wurde. Im Rahmen der Studie, die von der Siemens AG beauftragt worden war, wurde untersucht und anhand zweier Szenarien und eines konkreten Musterstadtteils [2] gezeigt, wie sich die Energieeffizienz durch verschiedene Maßnahmenbündel verbessern lässt und welchen Anteil diese Aspekte an der CO<sub>2</sub>-Reduktion haben. Ausgewählten Maßnahmen liegen zudem Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zugrunde.

Im „Ziel-Szenario“ können die Emissionen Münchens bis zum neuhundertsten Stadtjubiläum im Jahr 2058 durch flächendeckende und konsequente Effizienzmaßnahmen sowie durch eine Substitution von fossilen Energieträgern um etwa 90 % auf nur noch 750 kg pro Einwohner und Jahr verringert werden. Für 2008 lag der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Münchner noch bei 6,5 t. Im „Brücken-Szenario“ beträgt der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen 80 %.

## Überblick

Der Artikel fasst die Ergebnisse einer vom Wuppertal Institut durchgeführten Studie zusammen. Zunächst wird die Notwendigkeit CO<sub>2</sub>-freier Städte für eine erfolgreiche Klimapolitik herausgearbeitet. Darauf folgt eine Definition des Begriffs „weitgehende CO<sub>2</sub>-Freiheit“. Anschließend werden Annahmen und Ergebnisse der Studie im Überblick dargestellt, bevor auf die ökonomischen Chancen weitgehender CO<sub>2</sub>-Freiheit eingegangen wird. Überlegungen zu Mehrinvestitionen und Kosteneinsparungen im Gebäudebereich und eine abschließende Handlungsempfehlung runden den Beitrag ab.



Eine Metropole wie München kann sich innerhalb von 50 Jahren zu einer nahezu CO<sub>2</sub>-freien Stadt entwickeln. Die Weichen dazu müssen aber schon heute gestellt werden  
Foto: Mauritius

Die Studie leitet aus den neuesten Erkenntnissen der Klimaforschung ab, dass die Schaffung CO<sub>2</sub>-freier urbaner Infrastrukturen eine zentrale Voraussetzung ist, um im Kampf gegen den Klimawandel erfolgreich zu sein. Die Technologien hierfür sind vorhanden. Die Herausforderung besteht darin, heute mit dem Umbau zu beginnen.

## Die CO<sub>2</sub>-freie Stadt ist notwendig

Nach der Veröffentlichung des 4. Weltklimaberichts des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007 haben die Umweltminister der EU im Jahr 2008 genauer definiert, welche Konsequenz sich aus den neuesten Forschungsergebnissen ableitet: Bis zum Jahr 2050 müssen die weltweiten Treibhausgasemissionen um „mehr als 50 % gegenüber dem Stand von 1990“

reduziert werden. Dies entspricht einem weltweiten Ausstoß von ca. 18 Mrd. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent oder 2 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Kopf bei einer angenommenen Weltbevölkerung von rd. 9 Mrd. Menschen im Jahr 2050. Für die Industrieländer folgt daraus, dass sie ihre Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 verringern müssen.

Diesen Herausforderungen stellt sich das dieser Studie zugrundeliegende Konzept der weitgehenden CO<sub>2</sub>-Freiheit: So soll das Wirtschafts-, Energie- und Verkehrssystem Münchens, das heute – wie fast überall weltweit – überwiegend auf der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger beruht, innerhalb der nächsten 50 Jahre deutlich effizienter werden. Die dann noch benötigten Energiemengen sollen zu einem großen Teil erneuerbar, also CO<sub>2</sub>-frei bzw. CO<sub>2</sub>-arm, erzeugt werden.

## Erfolgreiche Klimapolitik benötigt Kursänderung in den Städten

Ob es der Menschheit gelingen wird, in den kommenden Jahrzehnten bei der Entwicklung energieeffizienter Infrastrukturen einen nachhaltigen und klimaschonenden Kurs einzuschlagen, wird in den Städten entschieden, denn sie sind in der Summe die größten CO<sub>2</sub>-Emittenten.

Die Großstädte bedecken gerade einmal 1 % der Erdoberfläche, verschlingen aber 75 % der eingesetzten Energie und stoßen 80 % der weltweit emittierten Treibhausgase aus, allem voran CO<sub>2</sub>. Und die Städte wachsen. Heute lebt gut die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Im Jahr 2025 werden es voraussichtlich bereits 60 % sein.

Zugleich aber sind die Städte dank der Konzentration von technischem Wissen und der Investitionsmittel auch der Schmelztiegel des Fortschritts. Hier werden neue Sichtweisen und Lösungen generiert und implementiert. Am Beispiel der Stadt München wurde in der Studie gezeigt, wie sich moderne energieeffiziente Technologien im großen Stil einsetzen und nachhaltige Stadtentwicklungskonzepte realisieren lassen.

Doch die dargelegte Entwicklung gibt es nicht frei Haus. Die Stadt München, ihre Bürger und Unternehmen werden für die CO<sub>2</sub>-Freiheit in den kommenden Jahrzehnten erhebliche Summen investieren müssen. Allerdings zeichnet sich schon heute ab, dass sich viele dieser Investitionen über Energieeinsparungen rechnen werden. Ein weiterer Gewinn ist, dass sich Potenziale für die lokale Wirtschaft mobilisieren lassen und Know-how aufbauen lässt, das für die Zukunft Standortvorteile bringt.

## Was bedeutet weitgehende CO<sub>2</sub>-Freiheit?

Der Begriff der CO<sub>2</sub>-Freiheit bezieht sich vor allem auf die Versorgung der Bevölkerung mit Strom und Wärme sowie die Verkehrsinfrastruktur. Für die Stromversorgung heißt dies jedoch nicht, dass jede aus regenerativen Energien erzeugte kWh Strom tatsächlich aus München stammen wird. Vielmehr ist davon auszugehen, dass München bilanziell einen Teil des regenerativ erzeugten elektrischen Stroms von außen bezieht.

In der Analyse wurden allerdings nicht alle Treibhausgasemissionen berücksichtigt, sondern nur energiebedingtes CO<sub>2</sub>, auf das in Industrieländern etwa 80 % und weltweit ca. 60 % der Treibhausgasemissionen entfallen. Die hier gewählte Abgrenzung umfasst

damit alle direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Heizungsanlagen und Kraftwerken auf dem Stadtgebiet, die CO<sub>2</sub>-Emissionen des von außen bezogenen Stroms sowie die Verkehrsemissionen der Münchner innerhalb und außerhalb der Stadtgrenzen. Nicht betrachtet wurden der Luftverkehr und die mit den durch Leben und Wirtschaften in München verbundenen Waren- und Güterströme anderswo verursachten Emissionen. Verhaltensänderungen der Verbraucher blieben ebenso unberücksichtigt wie die CO<sub>2</sub>-Kompensationsmöglichkeiten durch Aufforstung.

## Annahmen und Ergebnisse im Überblick

Anhand der Energiebilanz der Stadt München und der Entwicklung eines BAU-Szenarios wurden zunächst die CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt, die für die Zukunft zu erwarten sind, wenn kein Umsteuern in Richtung effektiver Klimaschutzpolitik erfolgt. In weiteren Schritten wurde dann untersucht, welche CO<sub>2</sub>-Reduktionen sich mit den heute bekannten und bewährten Technologien erreichen lassen. Dabei wurde für die beiden Szenarien von den gleichen Grundprinzipien ausgegangen:

- hocheffiziente Energieanwendungen: Bei gleichem Komfort und Nutzen wird weniger Energie benötigt;
- Anpassung der Infrastruktur im Wärme-, Strom- und Verkehrsbereich an die massiv verringerte Energienachfrage;
- weitgehender Umstieg auf erneuerbare bzw. CO<sub>2</sub>-arme Energien;
- kein Autarkie-Anspruch: Die Stadt München importiert Energie zum Teil von außen, berücksichtigt dabei aber, dass diese weitestgehend klimaneutral erzeugt wird.

Die beiden untersuchten Szenarien unterscheiden sich in wenigen Punkten:

■ Während im „Ziel-Szenario“ davon ausgegangen wird, dass die Verbraucher bei ihren Investitionsentscheidungen überwiegend hocheffiziente elektrische Geräte und Anlagen einsetzen, wird im „Brücken-Szenario“ unterstellt, dass diese Effizienzgewinne zu einem geringeren Teil ausgeschöpft werden und durch zusätzliche Stromnachfrage kompensiert werden.

■ Im „Ziel-Szenario“ wurde eine moderate Verlagerung des Individualverkehrs auf den öffentlichen Verkehr sowie auf den nicht-motorisierten Verkehr angenommen und erwartet, dass der Stadtverkehr langfristig

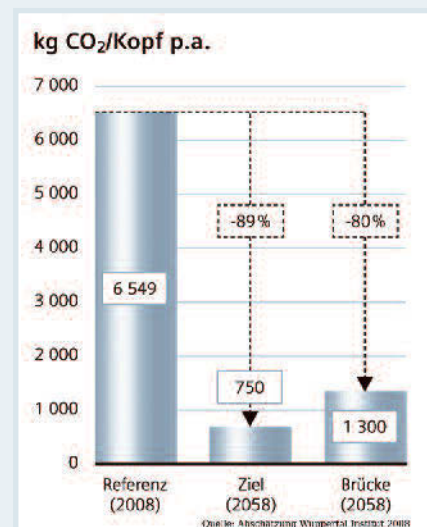


Abb. 1 Verringerung der Pro-Kopf CO<sub>2</sub>-Emissionen Münchens in den Szenarien „Ziel“ und „Brücke“

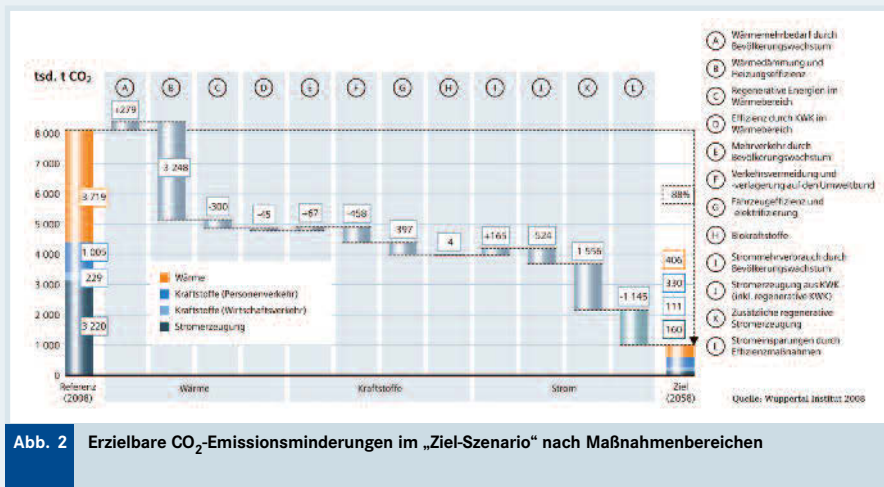
zu rd. 80 % mit Elektrofahrzeugen abgewickelt wird. Dagegen werden im „Brücken-Szenario“ eine konstante Verkehrsleistung sowie ein gleich bleibender Modal-Split und im innerstädtischen Verkehr ein Anteil von 30 % strombetriebenen Fahrzeugen unterstellt.

■ Im „Ziel-Szenario“ beruht die Stromerzeugung weitestgehend auf dezentraler Kraft-Wärmekopplung sowie auf regenerativen Energieträgern. Im „Brücken-Szenario“ werden hingegen zur Abdeckung des rd. 40 % höheren Strombedarfs zusätzlich Kohlekraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnik (Carbon Capture Storage, CCS) eingesetzt.

Im Folgenden soll zunächst das Gesamtergebnis dargestellt werden, um im nächsten Schritt detaillierter auf die Maßnahmen und Ergebnisse einzelner Bausteine einzugehen.

Im Szenario „Ziel“ können die Emissionen bis zum Jahr 2058 durch flächendeckende und konsequente Effizienzmaßnahmen sowie durch die Substitution von Energieträgern von 6,5 t im Jahr 2008 um etwa 90 % auf nur noch 750 kg pro Einwohner und Jahr verringert werden. Im „Brücken-Szenario“ erreichen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2008 rd. 1,3 t pro Einwohner und liegen damit um rd. 80 % niedriger als heute (vgl. Abb. 1). Abb. 2 quantifiziert die Emissionsminderungen, die sich durch die einzelnen Maßnahmen im Ziel-Szenario erreichen lassen. Für die vier wichtigsten Bausteine

- Wärmenachfrage Gebäude (B),
- Effizienzsteigerung bei der Stromanwendung (L),

Abb. 2 Erzielbare CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen im „Ziel-Szenario“ nach Maßnahmenbereichen

- Verkehr (F und G) sowie
- Strombereitstellung (K)

werden im Folgenden die Annahmen und Ergebnisse für das Ziel-Szenario näher erläutert und im letzten Kapitel einige Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung dargestellt.

### Baustein Effizienzsteigerung im Gebäudebereich

Die Beheizung der Münchner Gebäude verursacht heute fast die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stadt. Die energetische Sanierung der Häuser kann damit erheblich dazu beitragen, die Emissionen zu reduzieren. Wie wichtig es ist, dabei von vornherein auf eine hochwertige Sanierung nach Passivhausstandard zu setzen, wird klar, wenn man sich vergegenwärtigt, dass der Sanierungszyklus bei Gebäuden etwa 50 Jahre beträgt. Ein wenig effizienter Kühlschrank ist schnell ausgetauscht, eine schlecht isolierende Gebäudehülle nicht. Heutige Entscheidungen bei der Gebäudesanierung wirken sich damit bis weit in die Zukunft aus.

Im Rahmen der Studie wurde unterstellt, dass bei der Sanierung von Wohn- und Dienstleistungsgebäuden der Passivhausstandard nahezu flächendeckend, d. h. im Neubau zu 85 % und im Altbau zu 80 %, umgesetzt werden kann. Lediglich ein kleiner Rest wird diese Standards aus verschiedenen Gründen nicht erreichen, bspw. weil dem besondere Gebäudenutzungen oder der Denkmalschutz entgegenstehen. Der Heizwärmebedarf der sanierten Gebäude wird dadurch von heute etwa 200 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr (kWh/m<sup>2</sup> a) auf 25 bis 35 kWh/m<sup>2</sup> a abgesenkt. Beim Neubau kann der Heizwärmebedarf noch weiter gesenkt werden, da ein großer Teil der Gebäude sogar nach Plus-

energiestandard errichtet wird. Der Wärmebedarf der Neubauten sinkt gegenüber dem heutigen Standard von 80 bis 100 kWh/m<sup>2</sup> a auf 10 bis 20 kWh/m<sup>2</sup> a. Gleichzeitig werden die neuen Gebäude mit Solarenergie ausgestattet, sodass die meisten bilanziell ihren Restenergiebedarf abdecken oder sogar die Überschussenergie ins Netz einspeisen können.

Heutzutage werden in Deutschland jährlich rd. 1,5 % des Gebäudebestands saniert – dabei wird aber nur jedes zweite oder dritte dieser Gebäude auch umfassend energetisch verbessert. Damit fast alle Gebäude innerhalb der nächsten 50 Jahre energetisch saniert werden, müssen drei- bis viermal mehr Hauseigentümer als heute ihre Häuser energetisch sanieren.

Neben den Maßnahmen zur Reduktion des Wärmebedarfs wurde auch ein Umbau der Infrastruktur der Wärmebereitstellung unterstellt. Soweit wirtschaftlich vertretbar, kommt bis 2058 rd. vier Fünftel der Wärmeenergie aus dem ausgebauten Fern- und Nahwärmesystem, das auf Kraft-Wärme-Kopplung basiert. Der Rest, der noch dezentral in den Gebäuden erzeugt wird, wird durch fossile Energieträger und Solarenergie abgedeckt. Insgesamt lassen sich auf diesem Wege die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wärmeversorgung um rd. 90 % senken.

### Baustein Effizienzsteigerung bei Stromanwendungen in Gebäuden

Der gesamte Stromverbrauch in Haushalt, Gewerbe, Industrie, Handel, Dienstleistungen und Verkehr verursachte im Jahr 2008 etwa 39 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen Münchens. Ohne entsprechende Maßnahmen wird dieser Anteil zukünftig voraussichtlich steigen. Dabei bestimmen zwei wesentliche Faktoren, den durch die Stromerzeugung verursachten CO<sub>2</sub>-Ausstoß – die

Nachfrage nach elektrischer Energie und die Erzeugung des Stroms selbst. Hier wird zunächst die Nachfrage-Seite betrachtet:

Das Szenario „Ziel“ geht davon aus, dass elektrische Energie in Gebäuden künftig erheblich effizienter genutzt wird. Trotz zusätzlicher elektrischer Anwendungen liegt der Stromverbrauch in den Haushalten und Büros der Zukunft im Durchschnitt um rd. 40 % niedriger als heute. Diese Reduktion wird erreicht durch

- den Einsatz stromeffizienter Hausgeräte und Büroanwendungen,
- den Einsatz effizienter Beleuchtung,
- die Optimierung der Gebäudesteuerung und -kühlung.

Allein durch eine intelligente Steuerung der Gebäudetechnik – insbesondere bei Heizung, Klimaanlage und Licht – kann schon heute in großen Gebäuden bis zu 30 % Strom gespart werden. Mit diesen Technologien lassen sich Gebäude jederzeit nachrüsten, ohne dass dafür eine aufwändige Sanierung nötig wäre. Während heute in vielen Dienstleistungsgebäuden Beleuchtung, Heizungspumpen und Lüftung den ganzen Tag eingeschaltet sind, kann mit moderner Steuerungstechnik der Strom- und Wärmeverbrauch reduziert werden: Bewegungs- und Tageslichtsensoren sorgen dafür, dass Licht nur dort an ist, wo sich Menschen befinden und wo das einfallende Tageslicht nicht ausreichend ist; CO<sub>2</sub>-Sensoren messen, wie verbraucht die Luft ist, und geben bei Bedarf den Befehl an die Lüftungsanlage, wohl-dosiert Frischluft zuzuführen.

Im Haushaltsbereich wurde ermittelt, dass sich der durchschnittliche Stromverbrauch eines typischen Drei-Personen-Haushalts (mit elektrischer Warmwasserbereitung, ohne Nachtspeicherheizung) von heute 3 900 kWh auf etwa 2 100 kWh pro Jahr absenken lässt, wenn der Haushalt die heute auf dem Markt befindlichen effizienten Technologien konsequent nutzt. Dabei wurde noch nicht berücksichtigt, dass in vielen Bereichen der Stromanwendung in Zukunft weitere Effizienzsteigerungen zu erwarten sind.

Auch in der Industrie, auf die in München weniger als ein Viertel des gesamten Stromverbrauchs entfällt, lässt sich der Strombedarf durch effiziente Beleuchtung sowie dem Einsatz von Frequenzumrichter und effizienteren Motoren- und Antriebskonzepten gegenüber dem BAU-Szenario um 35 % verringern.

## Baustein Verkehr

In München trägt der Verkehr heute zu etwa 15 % zum gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei. Rd. 12 Prozentpunkte entfallen dabei auf den Personenverkehr, drei Prozentpunkte auf den Güterverkehr. Verglichen mit anderen deutschen Großstädten wie Hamburg oder Köln spielt der öffentliche Personenverkehr (ÖPNV) und der Fußgängerverkehr eine verhältnismäßig große Rolle; im Vergleich mit Schweizer Großstädten oder der Stadt Wien aber wird deutlich, dass die Potenziale der öffentlichen Verkehrsmittel und des nicht-motorisierten Verkehrs bei weitem nicht ausgeschöpft sind. Drei Grundannahmen prägen die Veränderungen des „Ziel-Szenarios“ im Verkehrssektor:

- eine Veränderung des Pro-Kopf-Verkehrsaufkommens um minus 10 % und eine moderate Änderung des Modal Split zugunsten des nicht-motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Verkehrs;
- die Umsetzung einer Effizienzstrategie, die sowohl die Effizienzpotenziale im Bereich des motorisierten Individualverkehrs (MIV) als auch im öffentlichen Verkehr ausschöpft;
- die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs.

Die leicht rückläufige Pro-Kopf-Verkehrsleistung ist durch städtebauliche Maßnahmen begründet: Heute liegen Arbeitsplatz, Wohnung und Geschäfte oft weit voneinander entfernt. Künftig könnten durch eine entsprechende Raum- und Stadtplanung Stadtteile der kurzen Wege geschaffen werden, in denen diese Funktionen stärker durchmischt sind. Bei der Planung von Verkehrsinfrastruktur haben ÖPNV sowie der Fußgänger- und Radverkehr Priorität. 2058 könnten so über 70 % aller Wege innerhalb der Stadt mit dem Umweltverbund zurückgelegt werden.

Der ÖPNV wird durch Informationssysteme und individuelle dynamische verkehrsmittelunabhängige Mobilitätsinformationen (z. B. über Mobiltelefone) und vereinfachte Zahlungsmöglichkeiten attraktiver gemacht. Auch Maßnahmen zur Verkehrslenkung, wie bspw. Straßenbenutzungs-Gebühren (Road-Pricing) oder ein City-Maut-System sind Teile des Handlungsrahmens. Durch ein integriertes Angebot von öffentlichem Verkehr und einem flexiblen Car-Sharing wird die Verkehrsmittelnutzung optimiert.

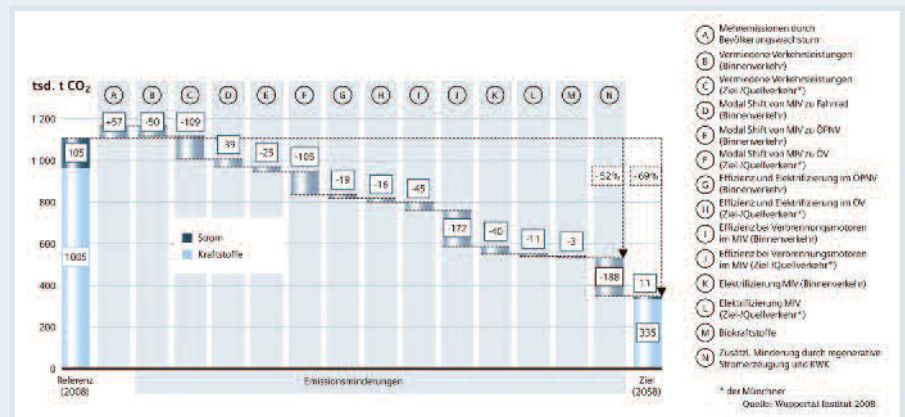


Abb. 3 Aufteilung der Emissionsminderung für das „Ziel-Szenario“ im Verkehrsbereich

Im Bereich des MIV wird davon ausgegangen, dass der spezifische Energieverbrauch von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gegenüber dem Jahr 2008 um ca. 40 % zurückgehen wird. Die Bandbreite an Einsparpotenzialen ist groß: sie umfasst Gewichtsverringern, Downsizing, Optimierung von Getriebe, Antrieb und Luftwiderstand, Leichtlaufreifen und weitere technische Maßnahmen wie Motorabschaltung, Zylindermanagement etc. Auch der angenommene zunehmende Einsatz von Dieselmotoren trägt zur Effizienzsteigerung der Fahrzeugflotte bei.

Ebenso sind im ÖV erhebliche Effizienzgewinne möglich: Durch die Rückgewinnung von Bremsenergie können Schienenfahrzeuge schon heute bis zu 25 % Strom sparen. Mit Leichtbau-Konstruktionen lässt sich zudem bis zu 30 % Energie gegenüber herkömmlichen U-, S- und Straßenbahnfahrzeugen einsparen. Die Stadt Oslo z. B. setzt seit Kurzem neue Metro-Waggons ein, die mit einem ausgeklügelten Antriebs- und Bremsmanagement ausgestattet wurden. Zudem sind die Waggons dank einer Spezialkonstruktion aus Aluminium besonders leicht. Alles in allem sind die Metro-Fahrzeuge um rd. ein Drittel sparsamer als ihre schon recht effizienten Vorgänger.

Der Anteil der elektrisch betriebenen Fahrzeuge im MIV nimmt stark zu. Viele Fahrzeuge werden kompakte elektrisch betriebene Stadtverkehrsfahrzeuge sein. Daneben könnten sich Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge durchsetzen, die für Kurzstrecken mit Elektromotoren und für Langstrecken mit Verbrennungsmotoren ausgestattet sind. Innerstädtische Fahrten werden so zu 80 % mit elektrischem Antrieb durchgeführt. Eine solche Entwicklung bedarf jedoch der unter Punkt 1 angesprochenen verkehrslenkenden Maßnahmen (vgl. Abb. 3).

## Baustein Strombereitstellung

Die Stadtwerke München erzeugen in ihren Heizkraftwerken, in Wasserkraftwerken und mit einer Kernkraftwerksbeteiligung deutlich mehr Strom, als derzeit im Stadtgebiet verbraucht wird (7 TWh; siehe Abb. 4). Die Studie geht davon aus, dass die Stadtwerke München die Stromnachfrage der Stadt auch künftig bilanziell durch eigene Stromerzeugungsanlagen sowie durch Beteiligungen decken werden. Im Jahr 2058 beträgt der Verbrauch im „Ziel-Szenario“ 5 TWh (im Szenario „Brücke“ 7,6 TWh).

Der größte Anteil davon wird in Gebäuden (Haushalte, Dienstleistungen) sowie Gewerbe und Industrie eingesetzt. Der motorisierte Individualverkehr benötigt trotz der weitgehenden Umstellung des innerstädtischen Verkehrs auf strombetriebene Fahrzeuge nur ca. 3 % der elektrischen Energie.

Anders als heute wird der in der Stadt München verbrauchte Strom nicht mehr in zentralen Großkraftwerken produziert, sondern verstärkt dezentral und überwiegend mittels erneuerbarer Energieträger erzeugt und teilweise gespeichert. Dabei gelangt ein ganzes Bündel an Technologien zum Einsatz: Kleinere Mehrfamilienhäuser werden sehr effizient mit Mikro-KWK oder Brennstoffzellen versorgt, die Strom und Wärme aus Biomasse oder aus Erdgas generieren. Zusätzlich erfolgt – wo immer geeignete Flächen zur Verfügung stehen – Stromerzeugung durch Photovoltaik. Auf der örtlichen bzw. regionalen Ebene kommen dezentrale Windkraftwerke sowie größere Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zum Einsatz, die mit Erdgas, Geothermie, Biogas oder fester Biomasse betrieben werden [3]. Über die örtliche Stromversorgung hinaus bezieht die Stadt München im Jahr 2058 Strom aus großen Offshore- und Onshore-Windparks

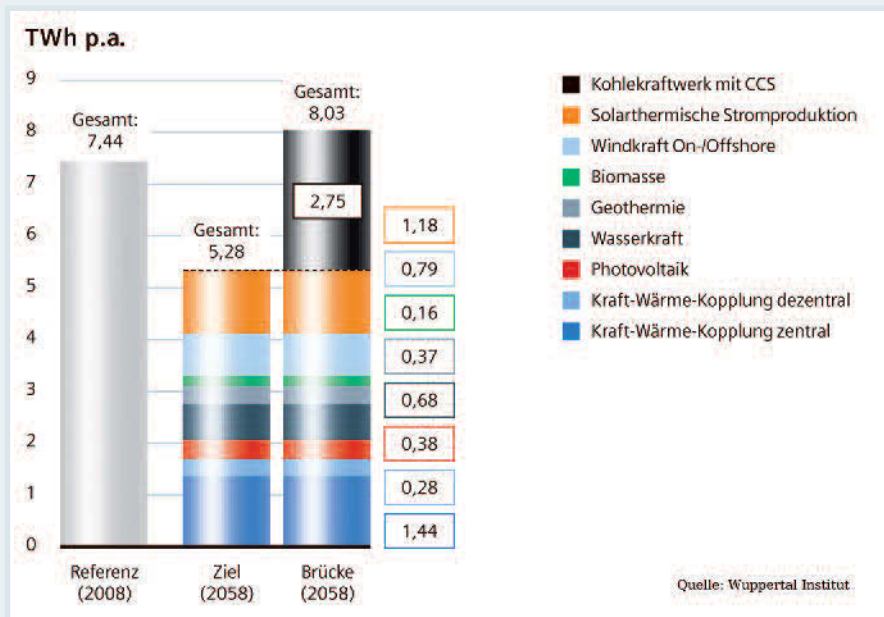


Abb. 4 Strombereitstellung im Jahr 2058 im „Ziel-“ und „Brücken-Szenario“

sowie aus solarthermischen Kraftwerken in Südeuropa oder Nordafrika.

Insgesamt lassen sich im Zielszenario die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromnutzung um rd. 95 % verringern. Den größten Beitrag dazu liefert der verstärkte Einsatz von regenerativen Energiequellen, gefolgt von der Stromeinsparung und der vermehrten Kraft-Wärme-Kopplung (vgl. Abb. 2).

#### Weitgehende CO<sub>2</sub>-Freiheit als ökonomische Chance

Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ist eine Wirtschaftlichkeitsrechnung eine besondere Herausforderung. Dies deshalb, weil einerseits die technische Entwicklung dazu führen wird, dass sich die Kosten der Effizienz-, der regenerativen und der konventionellen Energieerzeugungs-

Technologien im Zeitablauf verändern, andererseits aber auch die Energieträgerpreise sowie die Preise für die Verschmutzungsrechte [4] künftig großen Änderungen unterliegen werden.

In der Studie wird das Problem angegangen, indem die Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen offengelegt werden und verdeutlicht wird, dass die dargelegten Ergebnisse unter den entsprechenden Annahmen zustande kamen. Zum anderen werden für die Entwicklung der Energieträgerpreise zwei Preispfade (Hochpreis- und Niedrigpreisszenario) gewählt, um damit die Spannweite der Ergebnisse in Abhängigkeit der Annahmen über die Energiepreisentwicklung aufzuzeigen.

Im Gebäudebereich werden Investitionen bewertet, die eine Nutzungsdauer von 40, 50 oder z. T. mehr Jahren aufweisen. Im Gegensatz hierzu sind die Effizienztechnologien im Strombereich von kürzerer Lebensdauer. Dies bedeutet für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, dass auch die Stromeinsparung nur in diesem Zeitfenster wirkt. Bei einer Re-Investition in die Effizienztechnologie in 10, 15 oder 20 Jahren ist zu erwarten, dass durch Innovationen und technischen Fortschritt die Effizienztechnologien kostengünstiger geworden sind. Zudem wäre zu berücksichtigen, dass durch verbesserte Effizienztechnologie die Einsparung gegenüber den heutigen Standardtechnologien größer wird.

Da eine verlässliche Darstellung der Kosten der Effizienztechnologien der nächsten und übernächsten Gerätegeneration nicht möglich ist, beschränkten wir uns in der Studie auf die Betrachtung von Technologien, die bereits heute marktgängig sind. Exemplarisch wird an dieser Stelle zunächst das Ergebnis einer Kosten-Nutzenbetrachtung für eine Altbausanierung gezeigt. In einem zweiten Schritt werden die in München notwendigen Gesamtinvestitionen zur Sanierung der Wohngebäude dem Nutzen gegenübergestellt.

#### Mehrkosten der Altbausanierung auf Passivhausstandard

Die Kostenanalyse für eine energetische Sanierung existierender Gebäude wurde in zwei Schritten durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die Kosten der Sanierung auf Energieeinsparung(EnEV)-Niveau ermittelt, die in etwa zu einem Durchschnittsverbrauch von 100 kWh pro m<sup>2</sup> Wohnfläche führt. Sie liegen bei ca. 210 €/m<sup>2</sup> Wohnfläche. In einem zweiten Schritt wurde eine Sanierung analysiert, die zu einem

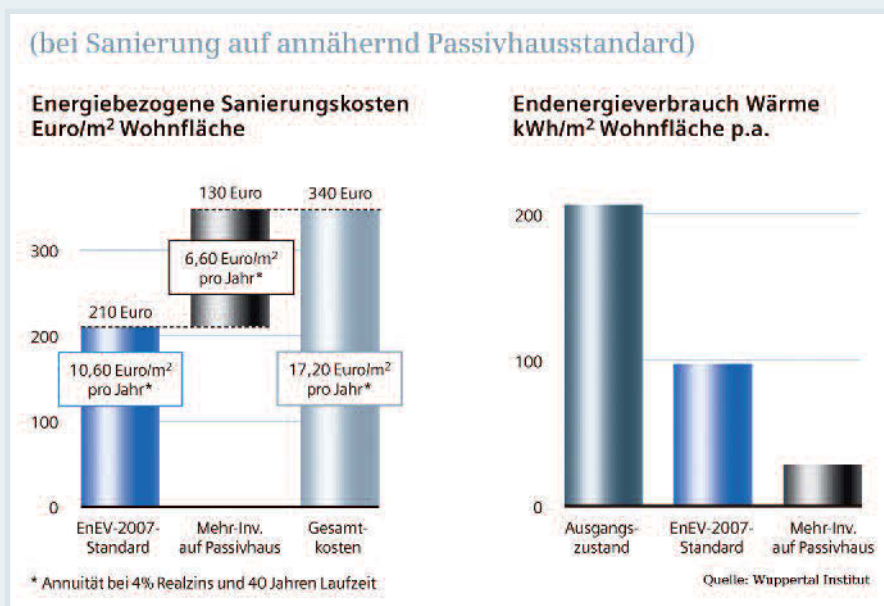


Abb. 5 Sanierungskosten und Endenergieverbrauch pro m<sup>2</sup> Wohnfläche bei weitergehender Sanierung im Altbau

Nutzenergieverbrauch von weniger als 30 kWh/m<sup>2</sup> führt. Die der energetischen Sanierung zuzuschreibenden Investitionen betragen etwa 340 €/m<sup>2</sup>. Durch zusätzliche Investitionen in Höhe von 130 € pro m<sup>2</sup> (linker Teil der Abb. 5) können demnach rd. 70 kWh pro m<sup>2</sup> gegenüber der Sanierung nach EnEV 2007-Standard eingespart werden (vgl. rechter Teil der Abb. 5).

Aus der Mehrinvestition von 130 € für die weitergehende Sanierung errechnet sich mit einem Realzins von 4 % über 40 Jahre pro m<sup>2</sup> sanierter Wohnfläche eine Belastung von 6,6 € pro Jahr. Bei einem Endenergiepreis von 8 ct pro kWh stehen diesen Kosten anfängliche jährliche Einsparungen von 5,6 € pro m<sup>2</sup> gegenüber. Über die Lebensdauer der Sanierungsmaßnahmen ergeben sich durchschnittlich Einsparungen von 8,50 €/m<sup>2</sup> (Hochpreisszenario) bzw. 7,10 €/m<sup>2</sup> (Niedrigpreisszenario).

#### **Mehrinvestition und Kosteneinsparung im Gebäudebereich**

Für eine Wärmesaniierung nach Passivhausstandard sowie beim Neubau von Passiv- oder Plusenergiehäusern sind zusätzliche Investitionen nötig. Die Mehrkosten gegenüber einem Standardbau nach EnEV 2007 sind beträchtlich. Dennoch lohnt sich der finanzielle Aufwand. Denn im Laufe der Zeit übersteigen die Einsparungen aufgrund der erheblich reduzierten Ausgaben für Erdgas und Erdöl die anfänglichen Investitionen bei weitem.

Nach den Berechnungen der Studie müssten die Stadt sowie die Bürger Münchens bis Mitte des Jahrhunderts für die zusätzliche energetische Sanierung der Gebäude sowie für die Zusatzkosten hocheffizienter Neubauten gegenüber der Trendentwicklung insgesamt rd. 13 Mrd. € mehr aufbringen, um die Stadt auf einen CO<sub>2</sub>-freien Pfad im Gebäudebereich zu bringen.

Bei den für das Jahr 2058 angenommenen Endverbraucherpreisen für Wärme von 16 ct/kWh im Niedrigpreispfad oder 26 ct/kWh im Hochpreispfad beträgt die jährliche Kosteneinsparung bei der Endenergie im Gebäudebereich rd. 1,6 Mrd. € bzw. 2,6 Mrd. €. Insgesamt würden sich die Energiekosteneinsparungen über den Gesamtzeitraum bis 2058 auf mehr als 30 Mrd. € belaufen.

#### **Große Chancen**

Die konsequente Orientierung am Ziel der CO<sub>2</sub>-Freiheit eröffnet den Städten große Chancen. Durch einen grundlegenden Um-

bau der Gebäude- und Energie- und Verkehrsstrukturen können Energiekosten vermieden und ökonomische Impulse gesetzt werden. Zudem wird ein Beitrag dazu geleistet, die Städte dauerhaft lebenswert zu erhalten.

Die hier dargestellte Studie zeigt erstmals umfassend Wege auf, wie sich eine Metropole wie München in 50 Jahren zu einer annähernd CO<sub>2</sub>-freien Stadt mit pro Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energienutzung von weniger als 1 t pro Kopf entwickeln könnte. Die Studie verdeutlicht, dass Klimaschutz schon heute im großen Stil machbar und durchaus wirtschaftlich sein kann. Darüber hinaus weist sie darauf hin, dass die konsequente Orientierung am Ziel der CO<sub>2</sub>-Freiheit der Metropole, ihren Unternehmen, Bürgern und Forschungseinrichtungen wertvolle Startvorteile bieten kann. Denn die Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-arme Gesellschaft steht weltweit bevor.

Die Wandlung einer Metropole in einen annähernd CO<sub>2</sub>-freien Ballungsraum ist andererseits eine große Aufgabe, die nur bewältigt werden kann, wenn das Ziel der CO<sub>2</sub>-Freiheit umfassend und mit sehr hoher Priorität in den gesamten Entwicklungsprozess der urbanen Infrastrukturen, in die Stadt-, Gebäude-, Verkehrs- und Energieplanung sowie in die Investitionsentscheidungen der privaten Akteure integriert wird. Das ist zum einen Aufgabe der Entscheider, der Verwaltungen, der Energieversorger und der Stadtplaner. Mindestens ebenso wichtig ist das Engagement der Bürger sowie der Investoren und deren klares Bekenntnis zur Energieeffizienz und entsprechend günstige politische Rahmen-

bedingungen, die effiziente und CO<sub>2</sub>-arme Technologien fördern.

#### **Anmerkungen**

[1] Lechtenböhrer, S.; Seifried, D.; Kristof, K.: *Sustainable Urban Infrastructure: Ausgabe München; Wege in eine CO<sub>2</sub>-freie Zukunft*. München, Siemens AG 2009.

[2] Auf den zweiten Teil der Studie, den Musterstadtteil, wird hier nicht näher eingegangen. Anhand des konkreten Musterstadtteils wird in der Studie analysiert, wie sich die Energieeffizienz in dem bereits bestehenden Stadtteil Neuaubing und dem geplanten Stadtteil Freiham-Nord soweit verbessern lässt, dass CO<sub>2</sub>-Freiheit annähernd erreicht wird.

[3] Für die Abstimmung dieser vielen dezentralen Erzeugungseinheiten ist ein sog. „Smart Grid“ oder virtuelles Kraftwerk erforderlich.

[4] Z. B. Emissionszertifikate für klimarelevante Schadstoffe im Rahmen des Kyoto-Abkommens.

---

*Dr. S. Lechtenböhrer, Dr. C. Barthel, Dr. S. Böhler, Dr. K. Kristof, Dipl.-Phys. F. Merten, Dipl.-Ing. F. Rudolph, C. Schneider, Dipl.-Ing. D. Schüwer, Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie GmbH; Dipl.-Ing., Dipl.-Volkswirt D. Seifried, Büro Ö-Quadrat, Freiburg; Dr. R. Hofmann, Universität Wuppertal*  
[stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org](mailto:stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org)

Die Autoren des Artikels bedanken sich bei den Mitarbeitern der Siemens AG und insbesondere bei Stefan Denig und Daniel Müller für die gute Kooperation im Rahmen der Studie sowie für die vielen wertvollen Hinweise und Diskussionsbeiträge.