



Christian Dieckhoff, Wolf Fichtner, Armin Grunwald, Sarah Meyer, Michael Nast, Linda Nierling, Ortwin Renn, Alfred Voß and Martin Wietschel (dir.)

Energieszenarien Konstruktion, Bewertung und Wirkung – Anbieter und "Nachfrager" im Dialog

KIT Scientific Publishing

Modellierung der Energienachfrage – der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien

Martin Wietschel, Tobias Fleiter and Simon Hirzel

Publisher: KIT Scientific Publishing
Place of publication: Karlsruhe
Year of publication: 2011
Published on OpenEdition Books: 17 janvier 2017
Series: KIT Scientific Publishing
Electronic EAN: 9782821877542



<http://books.openedition.org>

Electronic reference

WIETSCHEL, Martin ; FLEITER, Tobias ; und HIRZEL, Simon. *Modellierung der Energienachfrage – der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien* In.: *Energieszenarien: Konstruktion, Bewertung und Wirkung – Anbieter und "Nachfrager" im Dialog* [Online]. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011 (Erstellungsdatum: 08 septembre 2023). Online verfügbar: <<http://books.openedition.org/ksp/2954>>. ISBN: 9782821877542.

Modellierung der Energienachfrage – der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien

Martin Wietschel, Tobias Fleiter, Simon Hirzel

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Breslauer Straße 48, 76139
Karlsruhe, Deutschland, E-Mail: Martin.Wietschel@isi.fraunhofer.de,
Tobias.Fleiter@isi.fraunhofer.de, simon.hirzel@isi.fraunhofer.de

Einführung

Unbestritten spielen Energieeffizienzmaßnahmen auf der Nachfrageseite die wichtigste Rolle zur Erreichung ambitionierter Klima- und Ressourcenzielsetzungen. Allerdings hat sich die Energiewirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten primär auf die Energieerzeugung fokussiert. Diese Angebotsdominanz spiegelt sich auch in den Modellen wider, die zur Erstellung von Energieszenarien für öffentliche und industrielle Auftraggeber entwickelt und eingesetzt werden. Während dort eine Vielzahl an Modellaktivitäten zu finden ist, sind methodische Ansätze und Modelle zur Abbildung der Nachfrageseite bisher weniger entwickelt und eingesetzt.

Der folgende Beitrag hat zum Ziel, die bestehenden methodischen Ansätze zur Analyse der Energienachfrageentwicklung überblicksweise darzustellen und zu bewerten, sowie einen innovativen Ansatz etwas ausführlicher vorzustellen. Dies geschieht nach einem Abriss über die Rolle der Energieeffizienz.

1 Energieeffizienz – der wichtigste Baustein einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Die Steigerung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite ist die mit Abstand wichtigste Maßnahme zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele. Dies zeigt eine Reihe von nationalen und internationalen Studien: So ist der wesentliche Baustein zur Erreichung des 80 % Treibhausgasminderungszieles in Deutschland bis zum Jahre

2050 im Energiekonzept der Bundesregierung die Energieeffizienz [Bundesregierung 2010]. Der Stromverbrauch soll bis 2020 gegenüber 2008 in einer Größenordnung von 10 % und bis 2050 von 25 % vermindert werden. Im Verkehrsbereich soll der Endenergieverbrauch bis 2050 um rund 40 % gegenüber 2005 zurückgehen. Der Wärmebedarf des Gebäudebestands soll bis 2050 um 80 % vermindert werden. Auch eine aktuelle Studie der IEA [IEA 2010] zeigt, dass zur Erreichung des 2-Grad-Erderwärmungszieles rund 40 % der Treibhausgasreduzierung aus der rationellen Energienachfragenutzung auf der Nachfrageseite kommen muss (Abbildung 1). Dann folgen mit Abstand der Beitrag der erneuerbaren Energien, die CO₂-Abscheidung, ein Wechsel der Brennstoffe und danach dann die Kernenergienutzung. Auch diverse Studien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zeigen vergleichbare Minderungsbeiträge [siehe beispielsweise Barker et al. 2007].

Die Energieeffizienz ist allerdings nicht nur bedeutsam zum Klimaschutz, sondern sie kann wesentlich dazu beitragen, auch der sich abzeichnenden Verknappung fossiler Ressourcen und damit einhergehender wirtschaftlicher Herausforderungen zu begegnen. Weiterhin sind viele dieser Maßnahmen mit vertretbaren wirtschaftlichen Belastungen bzw. sogar mit wirtschaftlichen Gewinnen verbunden [siehe Eichhammer et al. 2008; Wietschel 2010]. Dies stellt bezahlbare Energieausgaben trotz der notwendigen Neugestaltung der Energiesysteme auch in Zukunft sicher.

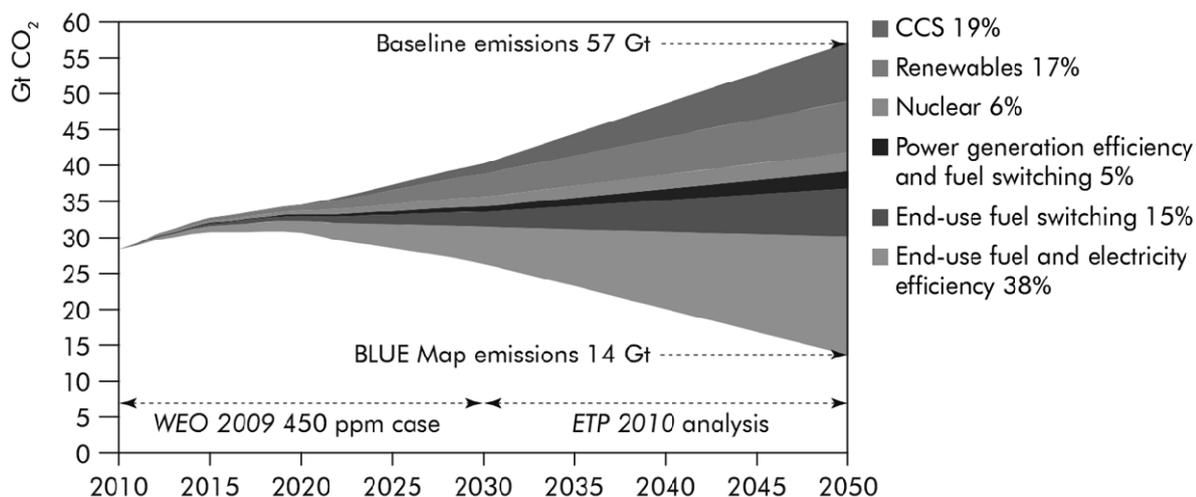


Abbildung 1: Schlüsseltechnologien für eine CO₂-Reduzierung [IEA 2010]

2 Methodische Ansätze zur Modellierung der Energienachfrage

Seit den 50er Jahren werden Modelle zur Energienachfrageprognose entwickelt. Die ersten Ansätze hierzu waren Zeitreihenanalysen und Trendprojektionen. Die entscheidenden Annahmen hierbei sind:

- Alle notwendigen Informationen zur Generierung der Prognose stecken in der Zeitreihe.
- Muster oder Musterkombinationen wiederholen sich.
- Diese können alleine auf der Basis der historischen Daten identifiziert werden.

Hierzu werden verschiedene statistische Methoden wie Trendkurven, exponentielles Glätten oder Dekomposition angewandt [siehe Zuazagoitia 1993 zu den verschiedenen Ansätzen). Die Stärke dieser Ansätze liegt darin, gute Ergebnisse für kurzfristige Voraussagen zu erzielen. Bei auftretenden Strukturbrüchen weisen sie allerdings Schwächen auf. Weiterhin erklären sie die Gründe und Treiber für die Entwicklungen nicht (fehlende Kausalitätsprüfung).

Um diesen Nachteil zu beseitigen wurden dann ökonometrische Methodenansätze entwickelt und verstärkt eingesetzt. Auf rein statischer Basis wird versucht, die Treiber zu identifizieren und somit ein besseres Verständnis über die Gründe der Entwicklungen zu erreichen. Sie basieren aber noch auf den gleichen Annahmen wie die Zeitreihen und Trendmethoden (u. a. alle Information in historischen Daten enthalten). Wenn keine Strukturbrüche vorhanden sind, erzielen sie auch gute Ergebnisse, allerdings keine besseren bzw. sogar etwas schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu den Zeitreihenansätzen [siehe Goldfarb et al. 1988 und Huss 1985]. Weiterhin sind sie aufwändiger zu erstellen.

Kritik an den beiden bisher vorgestellten methodischen Ansätzen kam kaum auf, da die meisten der damit erstellten Energieprognosen deutlich über der tatsächlichen Entwicklung gelegen haben [Craig et al. 2002]. Sie sind nicht in der Lage, die Möglichkeiten zur Reduktion der Energienachfrage adäquat zu berücksichtigen. Gerade bei Langfrist-Prognosen wird dies deutlich. Aus dieser Kritik heraus [Chateau & Lapillonne 1978; Lapillonne & Chateau 1981] lässt sich die Entwicklung des dritten

methodischen Ansatzes erklären. Diese werden häufig als Simulationsmodelle, Endverbrauchsmodelle, technische Prozessmodelle oder Accounting-Modelle bezeichnet [Chateaux & Lappillone 1990]. Wesentliche Charakteristika dabei sind:

- Eine technologische Fokussierung, d. h. es fließen technische Parameter des modellierten Energiesystems ein (z. B. Wirkungsgrad, spezifische Energieverbräuche).
- Der Energieverbrauch wird detailliert und disaggregiert über die Analyse einzelner Verbrauchsbereiche oder Prozesse (beispielsweise Raumwärme oder die Aluminiumproduktion) abgeleitet.
- Die strukturellen Zusammenhänge der Variablen werden explizit modelliert (beispielsweise der Wärmeverbrauch über Anzahl an Wohnungen und Wohnungsgrößen).

Wegen ihrer detaillierten technologischen und sektoralen Tiefe werden diese Ansätze den Bottom-up-Methoden zugerechnet, im Gegensatz zu den ökonomischen Ansätzen, die der Top-Down-Methodik zugerechnet werden (vgl. Abbildung 2).

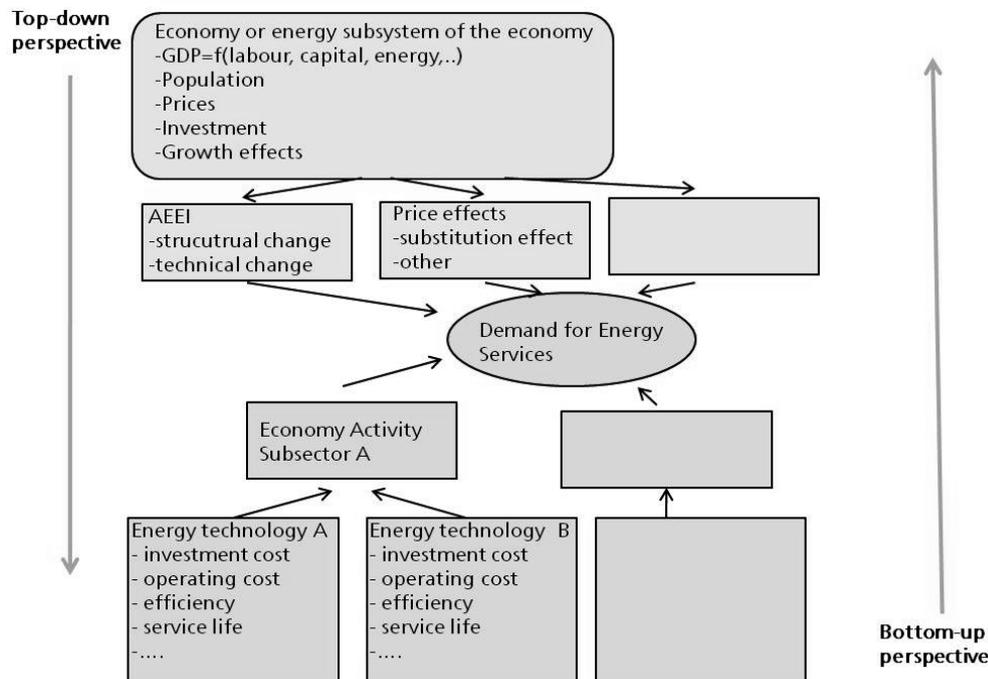


Abbildung 2: Vergleich der Bottom-up-Perspektive mit der Top-down-Perspektive zur Energienachfragemodellierung [vgl. Kavgić et al., 2010]

Auch die technologiebasierten Bottom-up Modelle können sich deutlich voneinander unterscheiden. So ist die erste Generation (häufig als Accounting-Modelle bezeichnet) noch relativ einfach aufgebaut, enthält aber bereits die typische Technologiestruktur (Beispiele sind MURE [Fraunhofer ISI et al. 2002] oder MAED [Hainoun et al. 2006]). Kosten und Energiepreise finden hier noch keinen Einfluss. Eine nächste Generation von Bottom-up Modellen ist stark an Angebotsseitige Modelle angelehnt und arbeitet mit Optimierungsalgorithmen, welche die Gesamtkosten des Energiesystems minimieren (Beispiele sind MARKAL [Gielen & Taylor 2007] oder AIM/end-use [Kainuma 2000]). Da besonders auf der Energienachfrage-seite allerdings kaum von einer Optimierung ausgegangen werden kann, wurden vielfältigste Simulationsmodelle entwickelt, die unterschiedliche Annahmen zum Verhalten der Energieverbraucher zulassen, die durchaus deutlich vom Bild des homo-economicus abweichen können (siehe z. B. SAVE production [Daniels & Van Dril 2007] oder CIMS [Jaccard 2005; Murphy et al. 2007]).

Die Stärken dieser Ansätze liegen darin, dass bestimmte neue technologische Entwicklungen wie Elektromobilität oder Wärmepumpen oder regulatorische Eingriffe wie Standards bei der Beleuchtung gut abgebildet werden können [Rivers & Jaccard 2006]. Auch Marktsättigungseffekte von Technologien (z. B. bei der Klimatisierung), physikalische Gesetzmäßigkeiten (z. B. der Carnot-Wirkungsgrad bei Verbrennungsmaschinen) oder technische Substitutionsgrenzen, beispielsweise zwischen Hochofenstahl und Elektrostahl, sind modellierbar.

Schwächen ergeben sich daraus, dass gewisse technologische Trends zu optimistisch oder pessimistisch bewertet werden können und künftig aufkommende, noch unbekannte Prozesse nicht direkt abgebildet werden. Über Zeiträume von 20 Jahren hinaus sind technologische Entwicklungen heute auch nur begrenzt vorauszusehen. Ein weiterer Nachteil ist auch das Fehlen von Preis- und Einkommenseffekten. Auch ist das Datenaufkommen sehr hoch und aufwendig zu erheben und pflegen. Dennoch sind diese Methoden sehr gut einsetzbar bei Analysen mit Horizonten von 3 bis 20 Jahren. Vergleichsstudien haben die im Durchschnitt besseren Ergebnisse gegenüber den anderen Methoden nachgewiesen [siehe Goldfarb et al. 1988 und Huss 1985]. Im folgenden Kapitel wird ein typischer Bottom-Up-Ansatz vorgestellt.

Neuere Ansätze setzen nun auf den Simulationsmodellen auf und versuchen, einige der erwähnten Schwachpunkte zu beseitigen. Diese Ansätze werden auch als Hybridmodelle bezeichnet, weil sie versuchen, verschiedene methodische Ansätze zu kombinieren. Ein Beispiel ist das kanadische Modell CIMS, welches Top-down Elemente mit Bottom-up Ansätzen in einem Hybridmodell verbindet [Jaccard 2005; Murphy et al. 2007].

3 Das Bottom-up Modell FORECAST

Im Folgenden wird das Modell FORECAST (**FOR**ecasting **E**nergy **C**onsumption **A**nalysis and **S**imulation **T**ool) vorgestellt, das einen Bottom-up-Ansatz zur Energienachfrageprognose und Identifikation von Energieeffizienzmaßnahmen ist.

Das Modell FORECAST setzt sich aus drei Einzelmodellen zusammen, die jeweils einem Energieverbrauchssektor zugeordnet sind. Diese sind die Industrie, Haushalte und der tertiäre Sektor. Da sich das Modell auf dem derzeitigen Entwicklungsstand noch auf die Stromnachfrage beschränkt, wird der Transportsektor nicht explizit modelliert. Für die drei Sektoren werden unabhängig nutzbare Teilmodelle eingesetzt, die zwar alle dem übergeordneten Ansatz der Bottom-up Modellierung untergeordnet sind, jedoch strukturell unterschiedlich aufgebaut sind, um so den Besonderheiten und Unterschieden der Sektoren Rechnung tragen zu können. Das Modell ist auf den Zeithorizont bis 2035 ausgerichtet und damit eher langfristig ausgerichtet. Der Stromverbrauch wird auf Länderebene ausgegeben. In die Berechnungen geht eine Vielzahl sowohl technischer als auch ökonomischer Eingangsparameter ein (Abbildung 3). Diese lassen sich aufteilen in Aktivitätsgrößen bzw. Treiber, wie die Anzahl der Haushalte, die Wertschöpfung oder die industrielle Produktion. Je nach Rahmendaten sind die Treiberniveaus aus übergeordneten Größen wie beispielsweise der Wertschöpfung oder der Bevölkerungsentwicklung unterschiedlich ausgestaltet.

Größen \ Modell	Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD)	Haushalte	Industrie
Haupttreiber (Aktivitätsgrößen)	- Fläche je Beschäftigtem - Anzahl Beschäftigte	- Anzahl Haushalte - Gebäudefläche	- Physische Produktion (t) - Wertschöpfung
Preise	- Energieträgerpreise (Gewerbe)	- n/a	- Energieträgerpreise (Industrie) - EUA Preise
Energiebilanzen und Emissionsfaktoren	- Eurostat Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger	- Eurostat Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger	- Eurostat Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger
Technologiedaten	Energiedienstleistungen: - Technologietreiber - Installierte Leistung - Jährliche Volllaststunden Einsparoptionen: - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion	Gerätedaten nach Effizienzklasse - Marktanteile - Spezifischer Verbrauch - Lebensdauer - Standby-Verbrauch - Standby-Zeit Gebäudebezogene Daten: - Dämmstärke - Nutzungsgrad Heizsystem - Technologieanteile für Heizung und Beleuchtung	Prozesse: - Spez. Energieverbrauch Einsparoptionen: - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion

Abbildung: 3 Eingangsgrößen der Submodelle von FORECAST

Wie üblich in technologiebasierten Nachfragemodellen basieren die erstellten Energieszenarien auf detaillierten Annahmen zur Entwicklung der Technologiestruktur. Diese setzen auch für das Basisjahr voraus, dass der Energieverbrauch detaillierter auf Energiedienstleistungen und Wirtschaftszweige verteilt wird, als dies in den verfügbaren Energiestatistiken der Fall ist (z. B. EUROSTAT). Somit eignet sich die im Modell verwendete Methodik, um eine konsistente Darstellung des Energieverbrauchs nach Verwendungszwecken zu ermöglichen, insbesondere für in der Statistik wenig detailliert ausgewiesene Sektoren wie Haushalte oder der tertiäre Sektor.

Beispielhaft wird in Abbildung 4 die Aufteilung des Stromverbrauchs nach Ländern und Energiedienstleistungen dargestellt [Fleiter et al. 2010]. Während in der Energiestatistik nach EUROSTAT nur ein Wert für den gesamten Stromverbrauch im tertiären Sektor angegeben ist, wird dieser im Modell auch auf die wichtigsten Energiedienstleistungen verteilt. Diese anhand von techno-ökonomischen Parametern wie Ausstattungsraten mit elektrischen Geräten, Wirkungsgraden oder typischen Nutzungsdauern berechneten Werte stellen die Grundlage für die Erstellung von Szenarien dar. Die Szenarien variieren sich folglich in diesen Parametern und erlauben zum einen einfache Überprüfungen der Realitätsnähe der Annahmen sowie die relativ gute Abbildung der Wirkung neuer, effizienter Technologien.

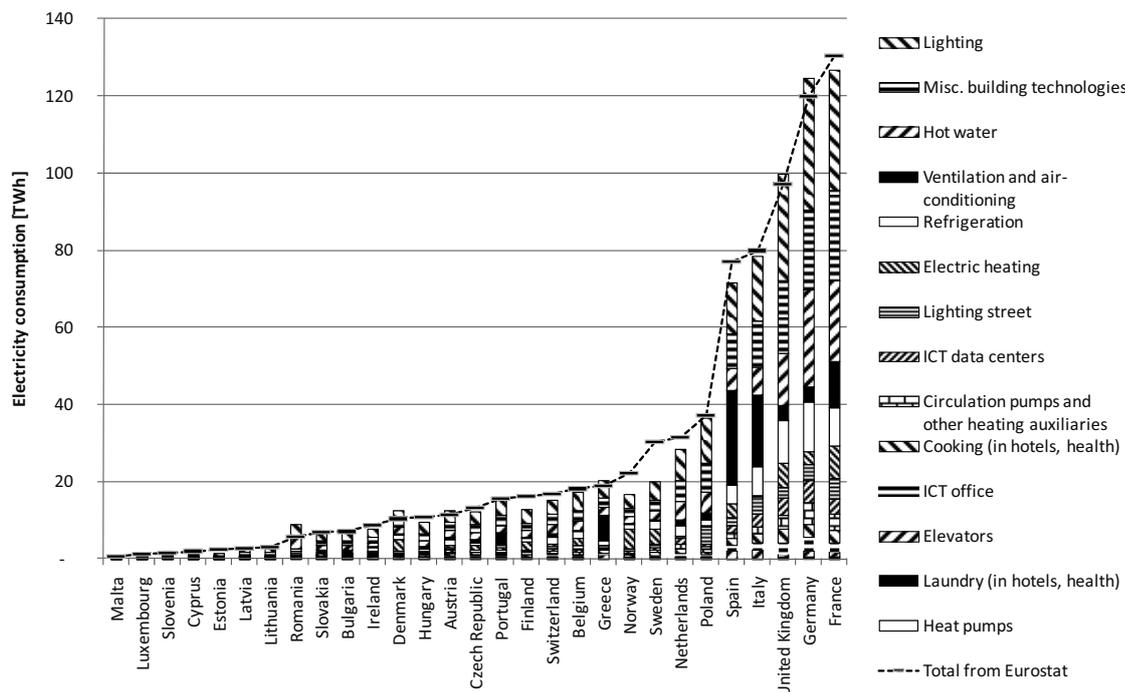


Abbildung 4: Stromverbrauch im tertiären Sektor der EU nach Ländern und Energiedienstleistungen 2007 [Fleiter et al. 2010]

In ähnlicher Weise wird auch für die Sektoren Industrie und Haushalte vorgegangen. Für das Haushalts-Submodell sind wichtige Treiber für die Energienachfrage die Anzahl der Haushalte, Ausstattungsraten und Effizienzklassen für typische Haushaltsgeräte oder die jeweilige Wohnfläche. Insgesamt lassen sich auf diese Weise Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Energienachfrage und darauf aufbauend Ableitungen hinsichtlich der Energienachfrage treffen.

Schlussfolgerungen

Der Modellierung der Nachfrageseite kommt zur Erstellung von Energieszenarien eine immer wichtigere Rolle zu, da die Reduktion der Nachfrageseite der entscheidende Baustein für eine nachhaltige Energieversorgung ist. Bisher existieren hierzu nur wenige Modelle. Bottom-up-Ansätze, die technologisch fundiert sind, oder Hybrid-Modelle erscheinen derzeit am geeignetsten für mittel- bis langfristige Prognosen zu sein. In Zukunft sollte ein stärkerer Fokus auf Modellentwicklung für die

Nachfrageprognose gelegt werden, um den Entscheidungsträgern wichtige Entscheidungsinformationen liefern zu können.

Literaturverzeichnis

- Barker T, Bashmakov, I, Bernstein, L., Bogner, JE., Bosch, PR, Dave, R., Davidson, OR, Fisher, BS, Gupta, S, Halsnæs, K, Heij, GJ, Kahn Ribeiro, S, Kobayashi, S, Levine, MD, Martino, DL, Masera, O, Metz, B, Meyer, L, Nabuurs, GJ, Najam, A, Nakicenovic, N, Rogner, HH, Roy, J, Sathaye, J, Schock, R, Shukla, P, Sims, REH, Smith, P, Tirpak, DA, Urge-Vorsatz, D & Zhou, D 2007, Technical Summary, In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds B Metz, OR Davidson, PR Bosch, R Dave & LA Meyer, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Bundesregierung 2010, *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, 28. September 2010, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Chateau, B; & Lapillonne, B 1978, Long-term energy demand forecasting A new approach, *Energy Policy*, vol. 6, no. 2, S. 140-157.
- Chateaux, B & Lappillone, B 1990, Accounting and End-Use Models. *Energy*, vol. 15, no. 3/4, S. 261-278.
- Daniels, BW & Van Dril, AWN 2007, Save production: A bottom-up energy model for Dutch industry and agriculture, *Energy Economics*, vol. 29, no. 4, S. 847-867.
- Jochem, E; Bradke, H; Cremer, C; Eichhammer, W; Köwener, D; Mannsbart, W; Radgen, P; Ragwitz, M; Schade, W; Sensfuss, F; Walz, R & Wietschel, M 2008, *Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland. Synthesebericht, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*, Fraunhofer ISI: Karlsruhe, 25. Juli 2008.
- Fleiter, T; Hirzel, S; Jakob, M; Barth, J; Quandt, L; Reitze, F; & Toro, F 2010, Electricity demand in the European service sector: A detailed bottom-up estimate by sector and by end-use, in *Konferenzband der IEECB 13-14.04.2010*, Frankfurt.

- Fraunhofer ISI; ISIS; Enerdata; ADEME 2002, *MURE Backcasting studies*, Karlsruhe, Rome, Grenoble, Paris, aufgerufen am 14. Dezember 2010, <http://www.mure2.com/doc/MURE_Backcasting.pdf>.
- Gielen, D & Taylor, M 2007, Modelling industrial energy use: The IEAs Energy Technology Perspectives, *Energy Economics*, vol. 29, no. 4, S. 889-912.
- Goldfarb, D & Huss, WR 1988, Building scenarios for an electric utility. *Long Range Planning*, vol. 21, no. 2, April 1988, S. 78-85.
- Hainoun, A; Seif-Eldin, MK & Almoustafa, S 2006, Analysis of the Syrian long-term energy and electricity demand projection using the end-use methodology, *Energy Policy*, vol. 34, no. 14, S. 1958-1970.
- Huss, WR 1985, What makes a good load forecast?, *Public Utilities Fortnightly*, 28 November 1985.
- IEA 2010, *Energy Technology Perspectives: scenarios & strategies to 2050*, Paris: OECD/IEA.
- Jaccard, M 2005, "Hybrid energy-economy models and endogenous technological change", In *Energy and Environment*, eds R Loulou, JP Waaub & G Zaccour, New York: Springer, S. 81-109.
- Kainuma, M 2000, The AIM/end-use model and its application to forecast Japanese carbon dioxide emissions. *European Journal of Operational Research*, vol. 122, no. 2, S. 416-425.
- Lapillonne, B & Chateau, B 1981, The MEDEE models for long term energy demand forecasting, *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 15, no. 2, S. 53-58.
- Murphy, R; Rivers, N & Jaccard, M 2007, Hybrid modeling of industrial energy consumption and greenhouse gas emissions with an application to Canada. *Energy Economics*, vol. 29, no. 4, S. 826-846.
- Rivers, N & Jaccard, M 2006, Useful models for simulating policies to induce technological change, *Energy Policy*, vol. 34, no.15, S. 2038-2047.
- Swan, LG & Ugursal, VI 2009, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, S. 1819-1835.
- Wietschel, M (ed.) 2010, *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*, Technologienbericht. ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Stuttgart, Fraunhofer Verlag.

Zuazagoitia, J 1993, *Long-term final Energy demand analysis for Chile*, Frankfurt a. M., Peter Lang Verlag.