

TECHNOLOGIEBASIERTE ANALYSE DER STROMNACHFRAGE IM DEUTSCHEN HAUSHALTSSEKTOR BIS 2050

Rainer Elsland, Tobias Boßmann, Martin Wietschel

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe, Tel.: +497216809438, Fax: +497216809272, Rainer.Elsland@isi.fraunhofer.de, <http://isi.fraunhofer.de/isi-de/index.php>

Kurzfassung:

Eines der größten Potentiale zur Senkung der Strom- respektive Endenergienachfrage in Deutschland weist der Haushaltssektor auf. Dieser befindet sich derzeit sowohl in Bezug auf die Zusammensetzung der Haushalte – Tendenz zu weniger Personen pro Haushalt – als auch in technologischer Hinsicht – z. B. zunehmende Verbreitung von Wärmepumpen – in einem strukturellen Wandel. Im Rahmen dieses Beitrages werden drei explorative Szenarien zur zukünftigen Entwicklung der Stromnachfrage im Haushaltssektor bis 2050 berechnet, um die Auswirkungen dieses Wandels zu untersuchen. Hierzu erfolgt in einem ersten Schritt die jahresdiskrete Berechnung der Stromnachfrage, aufgeschlüsselt nach einzelnen Technologien und unter Berücksichtigung der sich ändernden sozioökonomischen Treiber wie z. B. der Anzahl der Bevölkerung. Auf dieser Basis werden in einem zweiten Schritt technologiespezifische Lastprofile auf stündlicher Basis erstellt, um auch die strukturellen Auswirkungen der Stromnachfrageentwicklung auf die Lastganglinie innerhalb eines Tages zu untersuchen. Aus den Berechnungsergebnissen der jährlichen Stromnachfrage geht hervor, dass es im Referenzszenario zu einem Anstieg der Stromnachfrage um ca. 6 TWh (+4,3 %) bis zum Jahr 2050 – bezogen auf das Jahr 2008 – kommt, während die anderen beiden Szenarien mit ambitionierteren energiepolitischen Regularien zu einer Reduktion der Stromnachfrage um ca. 13 TWh (-9,3 %) respektive 27 TWh (-19,4 %) im selben Zeitraum führen. Bei den Lastprofilen lässt sich szenarienübergreifend ein relativer Anstieg der Stromnachfrage in der zweiten Tageshälfte zwischen 16 Uhr und 22 Uhr konstatieren, was primär auf die zunehmende Verbreitung von Wärmepumpen sowie von Geräten der Informations- und Kommunikationstechnologien zurückzuführen ist.

Keywords: Stromnachfrage, technologiebasierte Analyse, Lastprofil, Haushaltssektor

1 Hintergrund und Problemstellung

Die klimapolitischen Herausforderungen und die damit verbundene Notwendigkeit zur Transformation des Energiesystems stellen die zentralen Aufgaben der Energiewirtschaft in den kommenden Jahrzehnten dar. Der Gestaltungsrahmen für diesen Transformationsprozess wurde durch das im September 2010 veröffentlichte Energiekonzept der deutschen Bundesregierung vorgegeben, in welchem Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie zur Senkung der Primärenergie-, Endenergie- und Stromnachfrage definiert wurden [BMW i et al., 2010]. Die hohe Ambitioniertheit der Ziele lässt sich leicht anhand der Zielvorgabe zur Senkung der Primärenergienachfrage verdeutlichen, die bis zum Jahr 2050 eine Reduktion des pro-Kopf-Verbrauchs auf das Niveau der 1950er Jahren vorsieht [BMW i, 2011a]. Dabei stellt die Erschließung der

Einsparpotentiale auf der Energienachfrageseite eine wesentliche Determinante für den Grad der Umgestaltung des Energiesystems dar [IEA, 2010; WEC, 2011].

Eines der größten Potentiale zur Senkung der Endenergienachfrage weist der Haushaltssektor auf [BMW et al., 2010], der sich derzeit sowohl in Bezug auf die Anzahl der Personen pro Haushalte als auch in technologischer Hinsicht in einem strukturellen Wandel befindet. Im Hinblick auf die technologische Ausgestaltung der Haushalte zeigt sich, dass der Energieträger Strom bspw. aufgrund der Verbreitung von Wärmepumpen oder der ansteigenden Anzahl an elektrischen Kleingeräten zunehmend an Bedeutung gewinnt. Während sämtliche Studien unisono die zunehmende Verbreitung von strombasierten Technologien konstatieren, wird aufgrund von sehr ambitionierten Klimaschutzziele in aktuellen Studien wie den Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung [Prognos et al, 2010] oder der Studie ‚Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050‘ [Kirchner et al., 2009] eine stark rückläufige Stromnachfrage bis in das Jahr 2050 projiziert. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund interessant, dass die Reduzierung der Energie- respektive Stromnachfrage das wesentliche Element zur Erreichung der Klimaschutzziele darstellt. Da diese Studien im Hinblick auf die Annahmen, die Datengrundlage sowie die Entscheidungslogik der zugrunde liegenden Modelle teilweise intransparent sind, besteht die Notwendigkeit für die Durchführung einer transparenten und detaillierten Analyse.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen dieses Beitrages soll eine szenariobasierte Berechnung der zukünftigen Entwicklung der Stromnachfrage im deutschen Haushaltssektor bis 2050 erfolgen, die eine technologiespezifische Untersuchung ermöglicht. Die technologiespezifischen Entwicklungspfade sollen transparent dargelegt werden, um anschließend die Berechnungsergebnisse der Stromnachfrageprojektionen besser interpretieren und diskutieren zu können. Da für die Erreichung der Klimaschutz- und Ressourcenziele und der Transformation des Energieerzeugungssektors nicht nur die absolute Höhe der Stromnachfrage, sondern auch der zukünftige Lastgang der Stromnachfrage wesentlich ist, werden auch die strukturellen Auswirkungen der sich ändernden Stromnachfrage auf das Lastprofil der Haushalte untersucht.

Für die Erarbeitung der Fragestellung wird in einem ersten Schritt die technologiebasierte Berechnungsmethodik für die Ermittlung der jahresdiskreten Stromnachfrage beschrieben und anschließend auf die methodische Vorgehensweise zur nachgelagerten Erstellung von technologiespezifischen Lastprofilen für verschiedene Typtage eingegangen. In einem zweiten Schritt werden drei explorative Szenarien entwickelt und Rahmenparameter definiert, die als Grundlage für die quantitative Analyse dienen. Abschließend finden eine Diskussion der Berechnungsergebnisse und eine kritische Würdigung statt.

3 Methodik

3.1 Szenario-Technik als Instrument zur Ausgestaltung zukünftiger Entwicklungspfade

Für die Berechnung der Stromnachfrage im Haushaltssektor wird die Szenario-Technik herangezogen. Die Methodik der Szenarien-Technik grenzt sich dahingehend von Prognosen ab, dass Szenarien nicht darauf abzielen die wahrscheinlichste Entwicklung vorherzusagen, sondern plausible Entwicklungspfade für konsistente Annahmenbündel zu berechnen [Götze, 1993; IZT, 2008]. In Abhängigkeit der energiewirtschaftlichen oder klimapolitischen Fragestellung werden Szenarien i. d. R. explorativ oder normativ entwickelt [Nielsen et al., 2007]. Da diese Untersuchung darauf abzielt, die Auswirkung unterschiedlicher sozioökonomischer und technologischer Treiber auf die Entwicklung der Stromnachfrage im Haushaltssektor zu analysieren, erfolgt die Berechnung anhand explorativer Szenarien.

3.2 Technologiebasierter Modellierungsansatz zur Quantifizierung der Stromnachfrage

Für die Quantifizierung von Energie- bzw. Stromnachfrageszenarien kommen die Methodiken Top-down und Bottom-up zum Einsatz [Beeck, 1999; Forum für Energiemodelle, 2002]. Während bei der Top-down-Methodik die Berechnung der Energienachfrage anhand von sozioökonomischen Treibern und einer aggregierten Betrachtung von Technologien erfolgt, werden bei der Bottom-up-Methodik ebenso sozioökonomische Treiber einbezogen, wohingegen die einzelnen Technologien dezidiert anhand ihrer Spezifika abgebildet werden.¹ Die Bottom-up-Methodik weist im Wesentlichen die folgenden Charakteristika auf [Bhattacharyya et al., 2009; Catenazzi, 2009; Wietschel et al., 2011]:

- Die Energienachfrage wird detailliert und disaggregiert anhand einer Analyse einzelner Technologien abgeleitet.
- Es findet eine technologische Fokussierung statt, d.h. es fließen technische Parameter des modellierten Energiesystems ein (z. B. Wirkungsgrad, spezifische Energieverbräuche, Marktsättigungseffekte).
- Die strukturellen Zusammenhänge der modellierten Variablen werden explizit berücksichtigt (z. B. der Wärmeverbrauch über die Gebäudetypologie und -fläche).

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Bottom-up-Methodik für die Modellierung von langfristigen Zeithorizonten prinzipiell besser geeignet ist, da sie es ermöglicht, neben einer transparenten Interpretierbarkeit von Berechnungsergebnissen auch Wechselwirkungen zwischen sozioökonomischen und technologischen Parametern abzubilden [Craig et al.,

¹ Chronologisch betrachtet war die Motivation für die Entwicklung der Bottom-up-Methodik die signifikant zu hoch berechnete Energienachfrage in vielen Studien in den 1970er Jahren [Wilson et al., 1993], die auf die Beschränktheit der Top-down-Methodik, den strukturellen Wandel und verhaltensbedingte Maßnahmen abzubilden, zurückzuführen ist [Chateau et al., 1978; Lapillonne et al., 1981].

2002]. Aus diesem Grund erfolgt die Berechnung der Stromnachfrage des Haushaltssektors anhand der Bottom-up-Methodik.

Bottom-up-Energiemodelle lassen sich weiterhin unterscheiden nach Optimierungs- und Simulationsmodellen. Während Optimierungsmodelle darauf abzielen, die Systemkonfiguration hinsichtlich einer determinierten Zielgröße zu optimieren, wird bei Simulationsmodellen angestrebt, die zukünftige Entwicklung der Stromnachfrage auf der Grundlage von historischen Trends unter Berücksichtigung zukünftiger Rahmenparameter zu ermitteln. Im Hinblick auf die Projektion der Haushaltsstromnachfrage stellt der Simulationsansatz den geeigneteren Ansatz dar, da zum Einen das Entscheidungskalkül der Entscheidungsträger in den privaten Haushalten nicht auf einer Optimierungslogik basiert und zum Anderen die Beschränkung auf einen homo oeconomicus impliziert, dass eine Vielzahl an relevanten Entscheidungskriterien nicht mit in die Entscheidung einbezogen werden.

3.3 Konzeptioneller Aufbau des Energienachfragemodells

3.3.1 Systemgrenze

Die Wahl der Systemgrenze leitet sich aus der zu beantwortenden Fragestellung ab. Entsprechend wird die Gebäudehülle aller deutschen Haushalte als Systemgrenze festgelegt. Die berechnete Stromnachfrage ist definiert als Endenergie, die dem Verbraucher vor Ort zur Verfügung gestellt wird [Krimmling, 2007]. Die Stromnachfrage berechnet sich aus dem kumulierten Verbrauch der Elektrogeräte, der Beleuchtung und der Technologien zur Raumkonditionierung, ohne den Eigenverbrauch durch dezentrale Eigenstromerzeugung zu vernachlässigen. Interne Wärmegegewinne in Anlehnung an die DIN V 4108-6 [Normenausschuss Bauwesen, 2003] werden bei der Berechnung der Wärmebedarfsermittlung nicht berücksichtigt.

3.3.2 Treibergrößen und struktureller Aufbau

Für die szenariobasierte Berechnung der Haushaltsstromnachfrage sind sowohl Treibergrößen für die sozioökonomische als auch für die technologische Entwicklung zu definieren. Die sozioökonomischen Treiber sind die Anzahl der Haushalte, die aus der Anzahl der Bevölkerung und der strukturellen Zusammensetzung der Haushalte abgeleitet wird, die Wohnfläche von Alt- und Neubauten sowie das Bruttoinlandsprodukt. Da davon ausgegangen wird, dass das Entscheidungskalkül der Entscheidungsträger in den privaten Haushalten im Wesentlichen nicht aus einer homo oeconomicus-Überlegung basiert, sondern eine Vielzahl an anderen Kriterien mit in die Entscheidung zu Adoption einer neuen Technologien einfließen, gehen Investitionen und Energieträgerpreise nicht explizit in die Berechnung mit ein. Die Berechnung der technologiespezifischen Stromnachfrage ist in Anlehnung an die Datenverfügbarkeit und aufgrund der heterogenen technologischen Ausstattung der Haushalte differenziert nach vier Modulen untergliedert. Die Summe der vier Module ergibt die Stromnachfrage des Haushaltssektors (Abbildung 1).

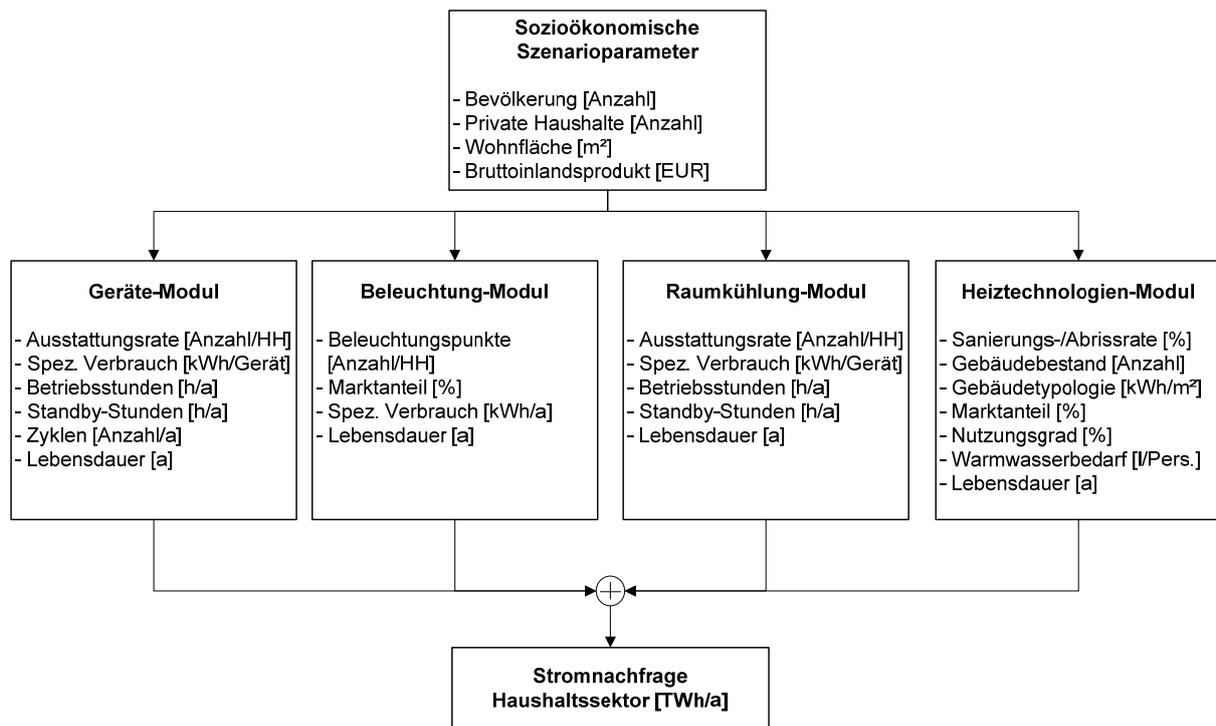


Abbildung 1: Struktureller Aufbau des Energienachfragemodells

Im Folgenden werden die Algorithmen für die Berechnung der einzelnen Module beschrieben.

3.3.3 Geräte-Modul

Aufgrund der hohen Datenverfügbarkeit über die Anzahl und die durchschnittlichen spezifischen Verbräuche von Haushaltsgeräten wird deren Stromnachfrage über ein Bestandsmodell (engl.: Vintage Stock Model) berechnet. Da für die Bestandsumwälzung in einem Vintage Stock Model auch vergangenheitsbezogene Daten zu erheben sind, werden in einem vorgelagerten Schritt zur Stromnachfrageprojektion konsistente empirische Zeitreihen für die jahresspezifische Geräteanzahl und den spezifischen Verbrauch der Geräte vom Jahre 1991 bis zum Basisjahr 2008 ermittelt. Dabei wird der spezifische Verbrauch in Anlehnung an die Ökodesign- und Labelling-Richtlinie [EU, 2009; EU, 2010] weiter nach Effizienzklassen differenziert, die über einen Energieeffizienzindex (EEI) und den spezifischen Verbrauch einer Referenztechnologie bestimmt werden.

Die Projektion des Gerätebestandes erfolgt mittels einer logistischen Funktion, die anhand der kleinsten-Quadrate-Abweichung der empirischen Bestandsentwicklung gefittet wurde, und die sich asymptotisch an eine determinierte Sättigungsgrenze annähert. Die Bestandsumwälzung bzw. Marktdiffusion neuer Technologien erfolgt anhand einer gerätespezifischen Nutzungsdauer mit normalverteilter Ausfallwahrscheinlichkeit [Voß, 2004], durch die der Zeitpunkt des Nutzungsdauer-Endes und -Anfangs determiniert wird.² Die Wahl der Effizienzklassen der ersetzten Altgeräte und des Bestandszuwachses, die als Neugeräte in den Bestand aufgenommen werden, orientiert sich an der Ausgestaltung des

² Für eine ausführlichen Überblick über verschiedene Ansätze zur Berechnung von Bestandsmodellen vgl. [Bucher, 2011].

Szenarios. Die jährliche Stromnachfrage aller Geräte $S_{Geräte,s,t}$ berechnet sich aus dem Produkt des spezifischen Verbrauchs³ $s_{t,G,T,E,s}$ und der durchschnittlichen Ausstattungsrate $A_{t,G,s}$, multipliziert mit der Anzahl der Haushalte HH_t .

$$S_{Geräte,s,t} = \sum_{G=1}^m \sum_{T=1}^l \sum_{E=1}^k (s_{t,G,T,E,s} \cdot A_{t,G,s}) \cdot HH_t \quad (1)$$

Indizes:

G : Gerätetyp, $m = 12$ E : Effizienzklasse, $k = 10$
 T : Technologie, $l = 18$ s : Szenario

Aufgrund des Kosten-Nutzen-Kalküls werden Haushaltsgeräte mit geringer Stromnachfrage wie bspw. Toaster oder Rasierer nicht explizit im Modell abgebildet, sondern aggregiert en bloc berechnet. Die Stromnachfrage wird über einen Indikator fortgeschrieben, der kumuliert die Auswirkung der durchschnittlichen spezifischen Effizienzentwicklung und der Ausstattungsraten beschreibt.

3.3.4 Beleuchtung-Modul

Der Treiber für die Berechnung der Stromnachfrage durch Beleuchtung ist die durchschnittliche Anzahl der Beleuchtungspunkte pro Wohneinheit. Entsprechend berechnet sich die Stromnachfrage durch Beleuchtung $S_{Bel,s,t}$ aus dem Produkt des spezifischen Verbrauchs der Beleuchtungstechnologien $s_{t,B,T,s}$, der Anzahl an Beleuchtungspunkten pro Wohneinheit $P_{B,s}$, dem prozentualen Marktanteil der Beleuchtungstechnologien $M_{t,B,T,s}$ und der Anzahl der Haushalte HH_t .

$$S_{Bel,s,t} = \sum_{B=1}^m \sum_{T=1}^l (s_{t,B,T,s} \cdot P_{B,s} \cdot M_{t,B,T,s}) \cdot HH_t \quad (2)$$

Indizes:

B : Beleuchtungstyp, $m = 2$ s : Szenario
 T : Technologie, $l = 5$

3.3.5 Raumkühlung-Modul

Die Berechnung der Stromnachfrage durch Klimatisierung erfolgt entsprechend zum Geräte-Modul über eine Bestandsmodell-Logik. Die bestandsorientierte Modellierung resultiert aus der Tatsache, dass eine bedarfsorientierte Berechnung in Anlehnung an eine durchschnittlich definierte Innentemperatur, entsprechend zur Raumwärme im Heiztechnologien-Modul (Kapitel 3.3.6), für Deutschland zu einer Überschätzung der Stromnachfrage durch Raumkühlung führen würde [Olonschek, 2011]. Die Stromnachfrage durch Raumkühlung $S_{Kühl,s,t}$ berechnet sich aus dem Produkt des spezifischen Verbrauchs der Technologien $s_{t,G,T,E,s}$ und der durchschnittlichen Ausstattungsrate $A_{t,G,s}$ multipliziert mit der Anzahl der Haushalte HH_t .

³ Der spezifische Verbrauch der Geräte basiert entweder auf Betriebsstunden (z. B. Fernseher) oder auf der Anzahl an Zyklen pro Jahr (z. B. Spülmaschine).

$$S_{Kühl,s,t} = \sum_{T=1}^l \sum_{E=1}^k (s_{t,G,T,E,s} \cdot A_{t,G,s}) \cdot HH_t \quad (3)$$

Indizes:

T : Technologie, $l = 6$ s : Szenario

E : Effizienzklassen, $k = 10$

3.3.6 Heiztechnologien-Modul

Die kumulierte Stromnachfrage des Heiztechnologien-Moduls setzt sich aus der Stromnachfrage für die Bereitstellung von Raumwärme $S_{RWärme,s,t}$, von Warmwasser $S_{WWasser,s,t}$ sowie für den Betrieb von Umwälzpumpen $S_{Umwälz,s,t}$ zusammen.

$$S_{Heiz,s,t} = S_{RWärme,s,t} + S_{WWasser,s,t} + S_{Umwälz,s,t} \quad (4)$$

Index:

s : Szenario

Die Berechnung der Stromnachfrage für die Bereitstellung von *Raumwärme* erfolgt anhand eines bedarfsorientierten Ansatzes. Das bedeutet, dass vorgelagert zur Berechnung der strombasierten Wärmebereitstellung eine Berechnung zur Wärmebedarfsermittlung (Nutzwärme) erfolgt. Die Wärmebedarfsermittlung $N_{RWärme,s,t}$ berechnet sich aus dem Produkt der Anzahl der Gebäude im Bestand $HH_{t,B,Y,s}$, dem Sanierungsgrad des Gebäudes $G_{t,B,Y,s}$ und der Fläche je Gebäudetyp $W_{t,B,Y,s}$. Dabei findet eine Differenzierung der Gebäude nach den Baualtersklassen ‚alt‘ (vor 1975), ‚mittel‘ (1975-2008) und ‚neu‘ (nach 2008) sowie bei den Gebäudetypen nach Einfamilien-/Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern statt. Der wesentliche Parameter für die Bestandsumwälzung der Gebäude ist dabei die vorgegebene Abrissrate und die Neubaurate, die aus der definierten Anzahl an Gebäuden im Rahmen der Szenario-Ausgestaltung determiniert werden.

$$N_{RWärme,s,t} = \sum_{B=1}^m \sum_{Y=1}^l HH_{t,B,Y,s} \cdot G_{t,B,Y,s} \cdot W_{t,B,Y,s} \quad (5)$$

Indizes:

B : Baualtersklassen, $m = 3$ s : Szenario

Y : Gebäudetyp, $l = 2$

Für die Berechnung der Stromnachfrage durch Raumwärmebereitstellung $S_{RWärme,s,t}$ sind zusätzlich zu strombasierten Heiztechnologien auch andere Energieträger zu berücksichtigen, um Substitutionsalternativen abbilden zu können. Die strombasierte Raumwärmeberechnung erfolgt aus dem Quotienten der Nutzwärme $N_{RWärme,s,t}$ und des Nutzungsgrades $U_{t,T,s}$ (zur Berechnung der Endenergienachfrage für Raumwärmebereitstellung), multipliziert mit dem Marktanteil an strombasierten Heiztechnologien $M_{t,T,s}$.

$$S_{RWärme,s,t} = \sum_{T=1}^l \frac{N_{RWärme,s,t}}{U_{t,T,s}} \cdot M_{t,T,s} \quad (6)$$

Indizes:

T : Technologie, $m = 8$ s : Szenario

Der Treiber für die Stromnachfrage für die *Warmwasserbereitstellung* ist der tägliche Warmwasserverbrauch pro Haushalt. Die Stromnachfrage für die Warmwasserbereitstellung $S_{WWasser,s,t}$ berechnet sich aus dem Produkt der Anzahl an Litern Warmwasser pro Haushalt V_s und einem konstanten spezifischen Energieverbrauch für die Wassererwärmung von 21,1 (kWh/l)⁴ dividiert durch den Nutzungsgrad der Heiztechnologien $U_{t,T,s}$ und multipliziert mit dem Anteil an strombasierten Technologien zur Warmwasserbereitstellung $M_{t,T,s}$ und der Anzahl an Haushalten HH_t .

$$S_{WWasser,s,t} = \sum_{T=1}^l \frac{V_s \cdot 21,1 \text{ (kWh/l)}}{U_{t,T,s}} \cdot M_{t,T,s} \cdot HH_t \quad (7)$$

Indizes:

T : Technologie, $m = 8$ s : Szenario

Die Stromnachfrage durch *Umwälzpumpen* $S_{Umwälz,s,t}$ berechnet sich aus dem Produkt des spezifischen Verbrauchs der Gerätetypen $s_{t,T,s}$ und der durchschnittlichen Ausstattungsrate der Haushalte mit Umwälzpumpen $A_{t,s}$ multipliziert mit der Anzahl der Haushalte HH_t .

$$S_{Umwälz,s,t} = \sum_{T=1}^l (s_{t,T,s} \cdot A_{t,s}) \cdot HH_t \quad (8)$$

Indizes:

T : Technologie, $m = 8$ s : Szenario

3.4 Methodischer Ansatz zur Erstellung von Lastganglinien

Analog zur Berechnung der Stromnachfrage werden die Lastganglinien anhand eines Bottom-up-Ansatzes ermittelt. Technologiespezifische Lastganglinien ermöglichen die Analyse von strukturellen Veränderungen der einhüllenden Kurve der Lastganglinie anhand von Verschiebungen einzelner Technologien. Die Ermittlung der Lastganglinie über 8760 Stunden erfolgt differenziert nach technologiespezifischen Lastprofilen für einzelne Typtage mit einer stündlichen Auflösung. Durch die Unterteilung nach Typtagen können unterschiedliche Verbrauchscharakteristika innerhalb einer Woche und unterjährig abgebildet werden. Die Typtage werden unterschieden hinsichtlich [WK OÖ, 2011]:

- Wochentag: Werktag, Samstag und Sonntag
- Jahreszeit: Sommer-, Übergangs- und Winterperiode

Zur Berechnung eines Lastprofils für einen Typtag werden die jahresdiskreten Ergebnisse der Stromnachfrage der Haushalte anhand von Haushaltsmessungen (prozentualer Anteil einer Technologie an der gesamten Stromnachfrage je Stunde) in stündliche Lastprofile überführt und anschließend plausibilisiert. Die Verteilung der Kategorie ‚Sonstige‘ Technologien, die sämtliche elektrischen Kleinverbraucher enthält und deren Berechnung aufgrund des Kosten-/Nutzen-Kalküls nicht technologiespezifisch sondern en bloc erfolgt,

⁴ Die Konstante von 21,1 (kWh/l) berechnet sich aus einer Temperaturerhöhung des Wassers um 50 K multipliziert mit der spezifischen Wärmekapazität des Wassers von 1,16 (Wh/°C) und einem Zeitfaktor von 365 Tagen pro Jahr [EC, 2009].

wird über das Lastprofil anhand des relativen Anteils der Stromnachfrage der explizit modellierten Technologien zu jeder Stunde verteilt. Eine Parametrisierung der Lastprofile für die Folgejahre findet anhand der absoluten technologiespezifischen Stromnachfrage im jeweiligen Jahr statt.

4 Rahmenparameter der Szenarien

Die Berechnung der Stromnachfrage im Haushaltssektor erfolgt anhand von drei explorativen Szenarien: Referenzszenario (RS), Ambitionierte-Klimapolitik-Szenario (AKS) und Grünes-Deutschland-Szenario (GDS). In allen drei Szenarien wird davon ausgegangen, dass die bisher in Kraft getretenen energiepolitischen Regularien erfolgreich umgesetzt werden. Während der technologische Wandel im RS nach dem Jahr 2020 im Wesentlichen auf den autonomen Fortschritt zurückzuführen ist, wird im AKS von einer moderaten und im GDS von einer ambitionierten Weiterentwicklung von energiepolitischen Regularien respektive Zielsetzungen ausgegangen, die sich entsprechend auf die Diffusionsgeschwindigkeit von energieeffizienten Technologien auswirkt. Das Basisjahr für die Projektion der Stromnachfrage ist 2008.

4.1 Sozioökonomische Rahmenparameter

Für die Ausgestaltung der Szenarien wurden identische sozioökonomische Rahmenparameter festgelegt, um eine gute Vergleichbarkeit der Szenarien hinsichtlich unterschiedlicher technologischer Diffusionspfade zu gewährleisten. Die sozioökonomischen Rahmenparameter für die Bevölkerung, die Anzahl privater Haushalte, die Wohnfläche und das Bruttoinlandsprodukt (BIP) wurden in Anlehnung an die Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung [Prognos et al., 2010] ausgewählt.

Tabelle 1: Sozioökonomische Rahmenparameter

	Einheit	2008	2020	2030	2040	2050
Bevölkerung	Mio.	82,1	80,5	79,1	76,9	73,8
Anzahl privater Haushalte	Mio.	39,6	40,7	41,0	41,1	39,7
Wohnfläche	Tsd. m ²	3.293	3.530	3.639	3.728	3.653
BIP real (2000)	Mrd. EUR	2.277	2.437	2.632	2.868	3.158

4.2 Technologische Rahmenparameter für die Berechnung der Stromnachfrage

Als Rahmenparameter für die Standby- und Betriebsleistung sowie die Standby- und Betriebsstunden werden Daten aus Studien zur Haushaltsstromnachfrage, Datenerhebungen von Marktforschungsinstituten und Verbänden⁵ sowie weitere technologiespezifische Daten für große Elektrogeräte⁶, IKT-Geräte⁷, Raumkühlung⁸ und Beleuchtung⁹ herangezogen. Die

⁵ Vgl. [ADEME, 2011; BMWi, 2011b; EC, 2009; GfK, 2009; GfK, 2010a; GfK, 2010b; GfK, 2010c; GfK, 2010d; Hansen et al., 2010; Schlomann et al., 2004; Seefeldt et al., 2010a; ZVEI et al., 2009]

⁶ Vgl. [Lefèvre, 2009; Prognos, 2007; eigene Schätzungen]

technologiespezifischen Ausstattungsraten der Haushalte und die durchschnittlichen spezifischen Verbräuche der Technologien im Basisjahr sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die angenommene Nutzungsdauer je Technologien basiert auf [Seefeldt et al., 2010a; eigene Schätzungen].

Tabelle 2: Ausstattungsrate der Haushalte und spezifischer Verbrauch pro Technologie im Basisjahr (2008)

		Ausstattungsrate [#/HH]	Spezifischer Verbrauch [kWh/ Gerät]
Elektrische Großgeräte	Waschmaschine	0,95	142
	Kühlschrank	1,01	260
	Gefrierschrank	0,55	241
	Wäschetrockner	0,39	239
	Spülmaschine	0,62	216
	Elektroherde	0,83	371
IKT-Geräte	Fernseher	1,63	194
	PC-Bildschirme	0,81	60
	Set-Top-Boxen	0,90	60
	Laptops	0,28	77
	Desktop PC	0,77	181
	Modem/Router	0,57	35
Raumkühlung	Klimaanlagen	0,03	489
Beleuchtung	(nicht-) gerichtete Beleuchtung	1,00	305

Für die zukünftige Entwicklung der Ausstattungsrate der elektrischen Großgeräte wird angenommen, dass diese sich bis auf Spülmaschinen und Wäschetrockner im Wesentlichen im Sättigungsbereich befindet. Der Rückgang des durchschnittlichen spezifischen Verbrauchs von elektrischen Großgeräten resultiert aus der Diffusion von Geräten höherer Effizienzklassen. Der größte Anstieg der Effizienzsteigerung ist bei Wäschetrocknern zu verzeichnen. Die Ausstattungsrate von IKT-Geräten wird bis auf Fernseher, die sich schon im Sättigungsbereich befinden, auch in Zukunft weiter stark ansteigen. Die Effizienzentwicklung wird vor allem durch die hohe Innovationsdynamik bei den Informations- und Kommunikationstechnologien getrieben. Für die Raumkühlung ist davon auszugehen, dass der individuelle Komfort-Anspruch und demzufolge auch die Marktdiffusion von Klimaanlagen in Zukunft ansteigen wird. Die durchschnittliche spezifische Effizienz von Beleuchtungstechnologien wird aufgrund des Glühbirnen-Verbots durch die Europäische Union [EP, 2011] und die zunehmende Verbreitung von Leuchtdioden und Energiesparlampen stark steigen. Des Weiteren werden elektrische Kleinanwendungen und

⁷ Vgl. [Fraunhofer IZM, 2007a; Fraunhofer IZM, 2007b; Fraunhofer IZM, 2009; GfK, 2009; IVF, 2007; eigene Schätzungen]

⁸ Vgl. [Adnot et al., 2003; GfK, 2010b; UBA, 2010, IWU et al., 2010]

⁹ Vgl. [Bertoldi et al., 2006; VITO, 2009; eigene Schätzungen]

die Stromnachfrage von neuen Technologien, die zukünftig auf den Markt kommen, im Modell en bloc als Kategorie ‚Sonstige‘ abgebildet. Für diese Kategorie wird von einem jährlichen Anstieg der Stromnachfrage von 2,5 % ausgegangen [Catenazzi, 2009].

Die Datengrundlage für die Berechnung der Nutzwärme basiert auf aktuellen Studien zur Anzahl der Gebäude im Bestand nach Baualtersklassen und deren Gebäudestandards (Sanierungsgrade).¹⁰ Für Einfamilienhäuser/Zweifamilienhäuser (EFH/ZFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) wurden sowohl für die Renovierung von Altbauten als auch für Neubauten vier Gebäudestandards definiert Tabelle 3.

Tabelle 3: Gebäudestandards von Alt- und Neubauten nach Szenarien

	Altbauten	EFH/ZFH [kWh/m ²]	MFH [kWh/m ²]	Neubauten	EFH/ZFH [kWh/m ²]	MFH [kWh/m ²]
2008	ohne Renovierung	198,0	123,0	Neubautyp 0	72,0	60,4
RS	Renovierungsgrad 1	88,2	86,2	Neubautyp 1	43,1	36,1
	Renovierungsgrad 2	35,0	30,0	Neubautyp 2	29,5	25,1
	Renovierungsgrad 3	25,0	24,0	Neubautyp 3	25,6	21,1
AKS	Renovierungsgrad 1	88,2	86,2	Neubautyp 1	36,8	31,6
	Renovierungsgrad 2	35,0	30,0	Neubautyp 2	21,9	18,8
	Renovierungsgrad 3	22,0	18,0	Neubautyp 3	17,5	15,0
GDS	Renovierungsgrad 1	88,2	86,2	Neubautyp 1	26,0	22,3
	Renovierungsgrad 2	35,0	30,0	Neubautyp 2	11,6	9,9
	Renovierungsgrad 3	19,0	10,0	Neubautyp 3	7,5	6,4

Als jährliche Abrissrate wurde ein Wert von 0,5 % aus der Zusatzerhebung des Mikrozensus des Statistischen Bundesamtes zum Bestand und der Struktur von Wohneinheiten zugrunde gelegt [StBA, 2006]. Die energetische Sanierungsrate für das RS wurde in Anlehnung an die derzeitige Sanierungsrate auf 1 % festgelegt, die über den gesamten Zeitraum bis 2050 konstant bleibt [Prognos et al., 2010]. Die Sanierungsraten in den Szenarien AKS und GDS steigen zunächst bis 2030 an und sinken bis 2050 wieder auf ein Niveau von knapp über einem Prozent (Tabelle 4). Nicht-energetische Sanierungen, sogenannte Pinsel-Sanierungen, sind in der Sanierungsrate nicht enthalten.

Tabelle 4: Sanierungsrate nach Szenarien

	2008	2020	2030	2040	2050
Referenz-Szenario	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Ambitionierte-Klimapolitik-Szenario	1,0 %	1,4 %	1,9 %	1,2 %	1,1 %
Grünes-Deutschland-Szenario	1,0 %	2,2 %	2,5 %	1,4 %	1,2 %

¹⁰ Vgl. [Henning et al., 2011 ; IWU et al., 2010 ; Neuhoff et al., 2011; Passivhaus Institut, 2009 ; Schimschar et al., 2011 ; Voss, 2009]

Der prozentuale Marktanteil an Heiztechnologien zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung im Basisjahr orientiert sich an aktuellen Studien (Tabelle 5).¹¹ Die Diffusion der unterschiedlichen Heiztechnologie-Typen basiert auf technologischen und regulativen Trends wie dem Ersatz von Nachtspeicheröfen auf der Grundlage der Energieeinsparverordnung (EnEV), dem rückläufigen Trend von elektrischen Direktheizungen, der zunehmenden Verbreitung von Wärmepumpen, einem nahezu konstanten Fernwärmeanteil, dem Rückgang von Kohle- und Öl-betriebenen Heizungen sowie dem weiteren Ausbau der Solarthermie. Die Verbreitung von Umwälzpumpen orientiert sich an der Anzahl der Heizsysteme mit Wasserkreislauf.

Tabelle 5: Marktanteil der Heiztechnologien zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung in 2008

Raumwärme	2008	Warmwasser	2008
Elektrische Heizung	4 %	Elektrischer Boiler	7 %
Wärmepumpe	1 %	Durchlauferhitzer	13 %
Heizöl	30 %	Integriertes Heizsystem	61 %
Erdgas	48 %	Wärmepumpe	1 %
Fernwärme	13 %	Gastherme	8 %
Kohle	2 %	Fernwärme	5 %
Solarthermie	1 %	Solarthermie	5 %
Biomasse	1 %		

4.3 Technologische Rahmenparameter für die Erstellung von Lastganglinien

Die Datengrundlage für die kumulierten Lastprofile an einzelnen Typtagen resultiert aus dem Projekt Intelliekon [BMBF, 2011], in dem u. a. Lastprofile auf stündlicher Basis für die Haushalte ermittelt wurden. Die Daten wurden im Rahmen von Stromverbrauchs-Messungen in etwa 1000 Haushalten im Zeitraum von Mitte 2009 bis Mitte 2010 für ein repräsentatives sozioökonomisches Panel erhoben und anhand des H0-Standardlastprofils für die Haushalte validiert, wobei sich eine Korrelation von ca. 90 % zeigen lies. Aufgrund der hohen Korrelation wurden diese Messungen als Grundlage für die Berechnung der Lastprofile im Basisjahr 2008 ausgewählt, allerdings mit der Einschränkung, dass lediglich die gemessenen Integrale für die einzelnen Typtage verwendet werden und nicht die einhüllende Kurve des Profils, da die ermittelte Stromnachfrage in den Nachtstunden – zwischen 2 und 6 Uhr – nicht plausibilisiert werden konnte.

Die Datengrundlage der technologiespezifischen Lastprofile basiert auf internen und externen Studien¹², in denen anhand von Haushaltsmessungen und Abschätzungen Werte auf stündlicher Basis ermittelt wurden. Für die Erstellung der Lastganglinien wurde angenommen, dass die Mitten der Monate Januar und Juli repräsentative Winter- bzw. Sommer-Monate darstellen. Die Mitten der Monate April sowie Oktober repräsentieren die

¹¹ [BDEW, 2010a; BDEW, 2010b; Blesl, 2010; Falkner, 2008; Kemna et al., 2007; eigene Schätzungen]

¹² Vgl. [Klobasa, 2006; Fonseca et al., 2009; Seefeldt et al., 2010b; SW Mainz, 2011a; SW Mainz, 2011b; SW Mainz, 2011c; eigene Schätzungen]

Übergangsjahreszeit, die sich wiederum je zur Hälfte aus einem Sommer- und Winter-Monat zusammensetzt. Die Lastprofile der Typtage sind linear verknüpft. Durch diese Form der Verknüpfung wird eine tägliche Abstufung des kumulierten Stromverbrauchs zwischen den einzelnen Tagen im Jahr erzielt. Diese Annahme bietet den Vorteil, dass keine Sprünge in der Stromnachfrage zwischen den einzelnen Monaten stattfinden und darüber hinaus eine bessere Berücksichtigung der jahreszeitlichen Unterschiede (Tag-Stunden vs. Nacht-Stunden) möglich ist.

5 Ergebnisse

5.1 Entwicklung der Stromnachfrage im Haushaltssektor bis 2050

Aus den Ergebnissen der Stromnachfrage in Abbildung 2 geht hervor, dass es durch die Steigerung der Effizienz bei Weißer Ware, die sich im Wesentlichen bereits im Sättigungsbereich befindet, zu einem kontinuierlichen Rückgang der Stromnachfrage kommt (2008 vs. 2050; -15,52 TWh (RS), -17,99 TWh (AKS), -19,89 TWh (GDS)). Bei Elektroherden hingegen heben sich die Effekte der Bestandserhöhung und Effizienzsteigerung nahezu auf (2008 vs. 2050; -0,76 TWh (RS), -1,27 TWh (AKS), -2,02 TWh (GDS)). Diese Untersuchungsergebnisse werden auch durch eine Studie der Gesellschaft für Konsumforschung gestützt, die für die Stromnachfrage von großen Elektrogeräten einen Rückgang von 25 % zwischen den Jahren 2000 und 2020 berechnet [GfK, 2011], was unter Berücksichtigung der Effizienzsteigerung der Weißen Ware in den Jahren 2000 bis 2008 den Ergebnissen dieser Studie nahe kommt. Eine gegenläufige Entwicklung zum rückläufigen Trend der Stromnachfrage von großen Elektrogeräten ist bei den IKT-Geräten zu erkennen (2008 vs. 2050; +12,55 TWh (RS), +3,74 TWh (AKS), -1,77 TWh (GDS)). Desktop PCs führen bis zum Jahr 2020 weiterhin zu einem stetigen Anstieg der Stromnachfrage und werden nach dem Jahr 2020 zunehmend durch Laptops substituiert, deren starker Bestandszuwachs sich signifikant auf die Stromnachfrage auswirkt. Die Markt-Diffusion von komplexen Set-Top-Boxen führt im RS und AKS zu einem signifikanten Anstieg der Stromnachfrage, während im GDS von einer sehr hohen Steigerung der spezifischen Effizienz ausgegangen wird, die den Anstieg der Ausstattungsraten kompensiert. In Abbildung 2 ist unter der Bezeichnung ‚Sonstige‘ auch die Stromnachfrage für sämtliche elektrische Kleinanwendungen aufgeführt, die mit einer konstanten jährlichen Änderungsrate von 2,5 % bis zum Jahr 2050 in allen Szenarien ansteigt und die neben den bekannten Kleinanwendungen (z. B. Föns, Toaster) auch die Stromnachfrage neuer Anwendungen beinhaltet (2008 vs. 2050; +14,57 TWh (RS), +14,57 TWh (AKS), +14,57 TWh (GDS)). Der kontinuierliche Anstieg dieses Blocks ist vor allem vor dem Hintergrund der Diffusion von neuen noch unbekanntem Kleingeräten zu interpretieren, die bei den Berechnungsergebnissen die Ursache dafür darstellen, dass es in den Szenarien zwischen 2040 und 2050 wieder zu einem leichten Anstieg der Gesamtstromnachfrage kommt.

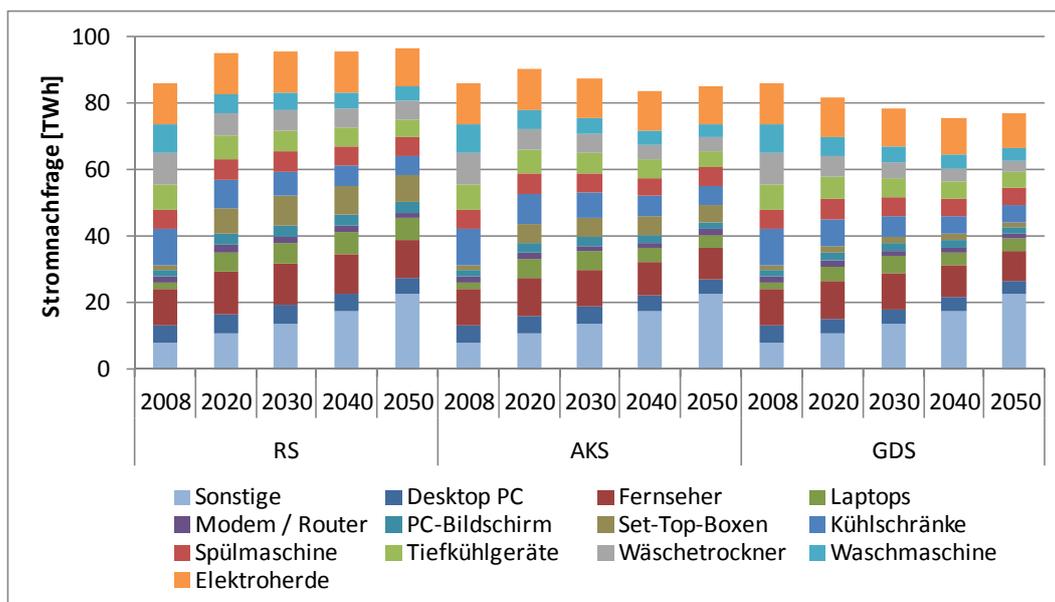


Abbildung 2: Stromnachfrage der elektrischen Großgeräte und IKT-Geräte nach Szenarien

Die Stromnachfrage durch Beleuchtung (Abbildung 3) entwickelt sich trotz des Anstiegs der Beleuchtungspunkte pro Wohneinheit aufgrund der starken Marktverbreitung von Energiesparlampen und Leuchtdioden in allen Szenarien rückläufig (2008 vs. 2050; -3,52 TWh (RS), -5,92 TWh (AKS), -7,12 TWh (GDS)). Die Stromnachfrage für Raumkühlung liegt im Jahr 2008 unterhalb von einem Prozent der Gesamtstromnachfrage des Haushaltssektors und wird auch bis zum Jahr 2050 für alle Szenarien dieses Niveau nicht übersteigen (2008 vs. 2050; +0,74 TWh (RS), +0,53 TWh (AKS), +0,24 TWh (GDS)). Der starke Anstieg der Stromnachfrage durch Wärmepumpen bis zum Jahr 2030 ist auf den häufigen Ersatz von bestehenden Heizsystemen und die Installation in Neubauten zurückzuführen (2008 vs. 2050; +9,61 TWh (RS), +10,90 TWh (AKS), +12,36 TWh (GDS)). Aufgrund gesetzlicher Vorgaben zu Nachtspeicheröfen und dem Rückgang an elektrischen Direktheizungen sinkt die kumulierte Stromnachfrage von Elektroheizungen kontinuierlich (2008 vs. 2050; -8,59 TWh (RS), -8,93 TWh (AKS), -11,50 TWh (GDS)). Entsprechend zur Raumwärmebereitstellung nimmt auch die Verbreitung von Wärmepumpen für die Warmwasserbereitstellung stark zu. Trotzdem kommt es wegen des kontinuierlich steigenden Nutzungsgrades von Wärmepumpen, dem sinkenden Marktanteil von elektrischen Boilern sowie Durchlauferhitzern langfristig zu einem Rückgang der Stromnachfrage für die Warmwasserbereitstellung (2008 vs. 2050; -0,01 TWh (RS), -4,35 TWh (AKS), -6,55 TWh (GDS)). Bei Umwälzpumpen lässt sich in allen Szenarien ein rückläufiger Trend der Stromnachfrage feststellen (2008 vs. 2050; -3,4 TWh (RS), -4,9 TWh (AKS), -5,4 TWh (GDS)).

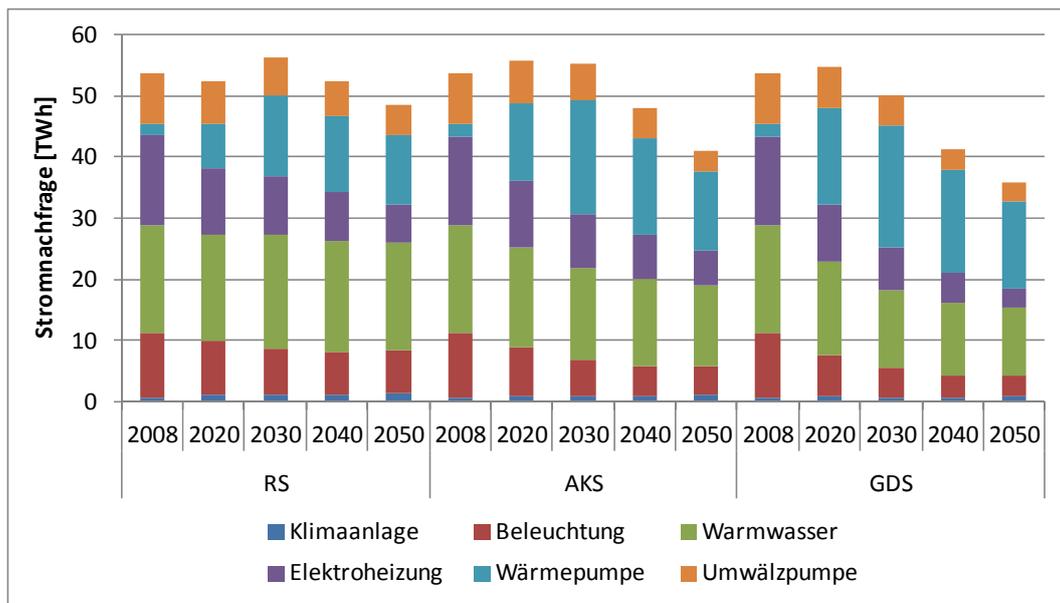


Abbildung 3: Stromnachfrage der Raumkühlung und Heiztechnologien nach Szenarien

Neben der Untersuchung der technologischen Entwicklungspfade ist die Interpretation der Szenarien vor allem vor dem Hintergrund der sozioökonomischen Rahmenparameter durchzuführen, da Anzahl der Haushalte bzw. Wohnfläche direkt als Multiplikator in die Berechnung mit einfließen. Das bedeutet, dass durch die Annahmen zur Entwicklung dieser beiden Treiber bereits ein wesentlicher Trend für die Entwicklung der Stromnachfrage vorgegeben wird und durch technologiespezifische Änderungen lediglich eine Überlagerung erfolgt. Somit kann es selbst bei einem Szenario mit einer sehr ambitionierten Effizienzsteigerung, bei einem Anstieg der Bevölkerung bzw. der Haushalte oder der Wohnfläche zu einer Erhöhung der Stromnachfrage kommen. Entsprechend der Szenariendefinition in Kapitel 4 basiert die Berechnung der drei Szenarien auf einer sinkenden Bevölkerungsentwicklung, die sich jedoch nur geringfügig dämpfend auf die Stromnachfrage auswirkt, da die steigende Anzahl der Haushalte dem dämpfenden Effekt entgegenwirkt und diesen letztendlich kompensiert. Würde die Bevölkerungsentwicklung also nicht wie bei der Obergrenzen-Prognose des Statistischen Bundesamtes bis zum Jahr 2050 auf 73,8 Mio., sondern wie bei der Untergrenzen-Prognose auf 69,4 Mio. [StBA, 2009] absinken, könnte die Stromnachfrage bei identischen Annahmen zur technologischen Entwicklung auch im RS rückläufig sein. Aus der Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse für die einzelnen Szenarien geht hervor, dass es im RS bis zum Jahr 2050 zu einem Anstieg der Stromnachfrage um ca. 6 TWh bezogen auf das Jahr 2008 kommt, während es im AKS zu einer Reduktion der Stromnachfrage um ca. 13 TWh und im GDS um 27 TWh kommt (Abbildung 4).

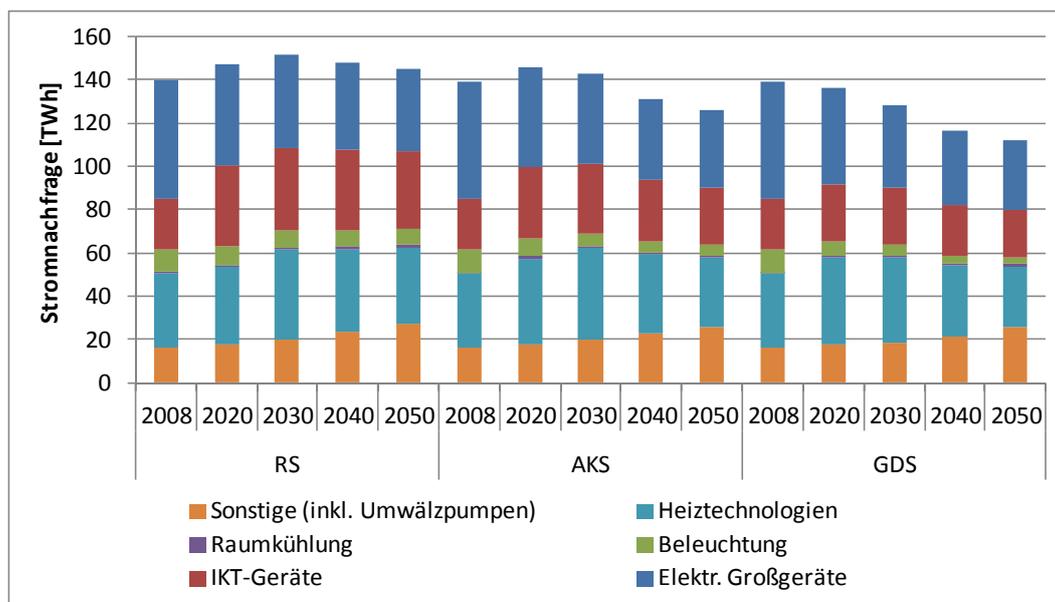


Abbildung 4: Gesamtstromnachfrage des Haushaltssektors nach Anwendungsbereichen und Szenarien

Eine Gegenüberstellung der untersuchten drei Szenarien zur Stromnachfrageentwicklung des Haushaltssektors mit den Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung zeigt, dass trotz der identischen sozioökonomischen Rahmenparameter im Referenzszenario des Energiekonzepts im Jahre 2050 die Stromnachfrage ca. 36,7 TWh geringer ist als im Referenzszenario dieser Untersuchung. Diese Tendenz spiegelt sich in den beiden ambitionierteren Szenarien wider. Die Stromnachfrage im Energiekonzept sinkt bis auf 92,3 TWh bzw. 85,4 TWh, während im AKS lediglich ein Rückgang der Stromnachfrage auf 125,9 TWh und im noch ambitionierteren GDS auf 112,4 TWh zu verzeichnen ist. Trotz der identischen sozioökonomischen Rahmenparameter ist ein direkter Vergleich dieser Ergebnisse jedoch nicht möglich, da die Szenarien des Energiekonzeptes auf der normativen und nicht auf der explorativen Szenario-Technik basieren, da im Energiekonzept die Ausarbeitung möglicher Entwicklungspfade für die Erreichung der energiepolitischen Zielvorgaben im Fokus steht und die Effizienzsteigerung der Szenarien entsprechend ambitioniert auszugestalten war. Auch die technologischen Diffusionspfade können nicht direkt verglichen werden, da im Energiekonzept die Annahmen zu den Rahmendaten nicht transparent dokumentiert sind und die Ergebnisse auf einem wesentlichen höher aggregierten Niveau ausgewiesen werden (Raumwärme, Warmwasser, Kochen und Elektrogeräte). Darüber hinaus ist der methodische Berechnungsansatz im Energiekonzept nicht beschrieben, wodurch ebenfalls ein Teil der Abweichungen erklärt werden könnte. Eine detaillierte Gegenüberstellung dieser Studie und des Energiekonzeptes könnte einen Aufschluss darüber geben, wie hoch die Potentiale zur Senkung der Stromnachfrage durch den technologischen Wandel und durch verhaltensbedingte Maßnahmen einzuschätzen sind.

5.2 Entwicklung der Lastprofile im Haushaltssektor bis 2050

Um die Auswirkungen einer sich ändernden Stromnachfrage auf die einhüllende Kurve eines kumulierten Lastprofils zu untersuchen, werden im Rahmen dieses Kapitels die

technologiespezifischen Lastprofile eines Werktages im Winter 2008 und eines Werktages im Winter 2050 (GDS) gegenübergestellt. Ein Beispiel für einen weiteren Werktag oder einen anderen Typtag in der Übergangszeit bzw. im Sommer wird nicht aufgezeigt, da die technologiespezifischen und strukturellen Auswirkungen einer sich ändernden Stromnachfrage am Lastprofil eines Wintertages am deutlichsten aufgezeigt werden können. Aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit kann nicht für jede Technologie ein technologiespezifisches Lastprofil entsprechend zum Detaillierungsgrad bei der Berechnung der jahresdiskreten Stromnachfrage dargestellt werden. Bei der Ausweisung der Lastprofile wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

- Kühlen fasst als Aggregat die Anwendungen Kühl- und Gefrierschränke zusammen.
- IKT wird als Aggregat für sämtliche IKT-Geräte ausgewiesen.

Aus der Gegenüberstellung der Lastprofile für einen Winter-Werktag lässt sich schlussfolgern, dass sich die starke Verschiebung bei der Wärmebereitstellung von elektrischer Heizung zu Wärmepumpen im Wesentlichen in einer höheren relativen Stromnachfrage in den Tag-Stunden und in einem Anstieg der Gesamtstromnachfrage nach 19 Uhr widerspiegelt. Dieser Effekt ist auf den Rückgang der Stromnachfrage durch Nachtspeicherheizungen zurückzuführen. Zudem findet die Nutzung all jener Anwendungen, die einen Anstieg der Stromnachfrage erfahren (insbesondere IKT) in den Tag-Stunden statt, wodurch es bspw. zwischen 14 Uhr und 16 Uhr zu einem relativen Anstieg der Stromnachfrage kommt. Weiterhin führt der Anstieg der Kategorie ‚Sonstige‘ zu einem signifikanten Anstieg des Lastprofils, der sich auch in der einhüllenden Kurve des Lastprofils widerspiegelt.

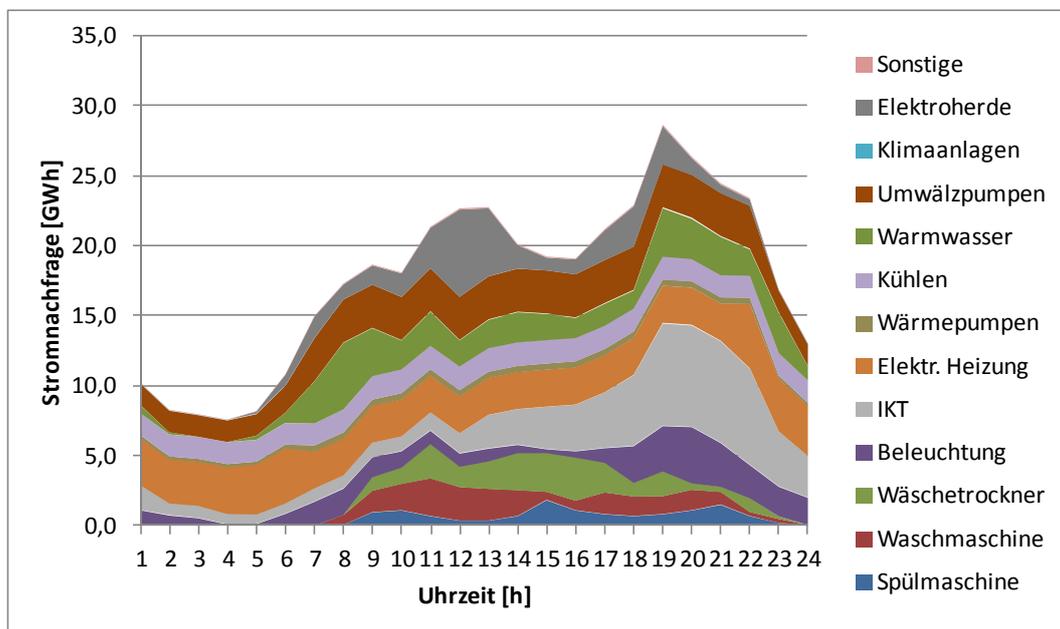


Abbildung 5: Lastprofil der Stromnachfrage an einem Werktag im Winter in 2008

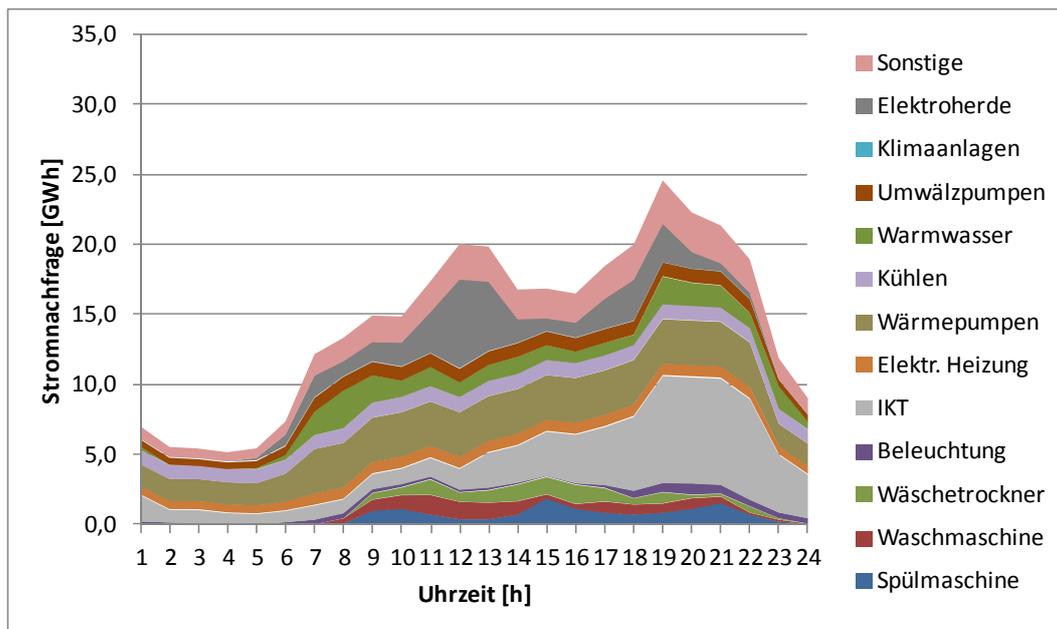


Abbildung 6: Lastprofil der Stromnachfrage an einem Werktag im Winter in 2050 im GDS

Anhand der Gegenüberstellung der Lastprofile von RS, AKS und GDS in 2050 können die Auswirkungen von strukturellen und technologischen Verschiebungen auf den Verlauf der einhüllenden Kurven des Lastprofils veranschaulicht werden (Abbildung 7). Für die Entwicklung der Lastprofile der einzelnen Typtage über den Zeithorizont lässt sich szenarienübergreifend ein relativer Anstieg der Stromnachfrage in der zweiten Tageshälfte zwischen 16 Uhr und 22 Uhr konstatieren. Diese strukturelle Veränderung ist primär auf den Anstieg der Stromnachfrage durch die zunehmende Verbreitung von Wärmepumpen sowie die zunehmende Verbreitung und Nutzung von Geräten der Informations- und Kommunikationstechnologien in den Abendstunden zurückzuführen.

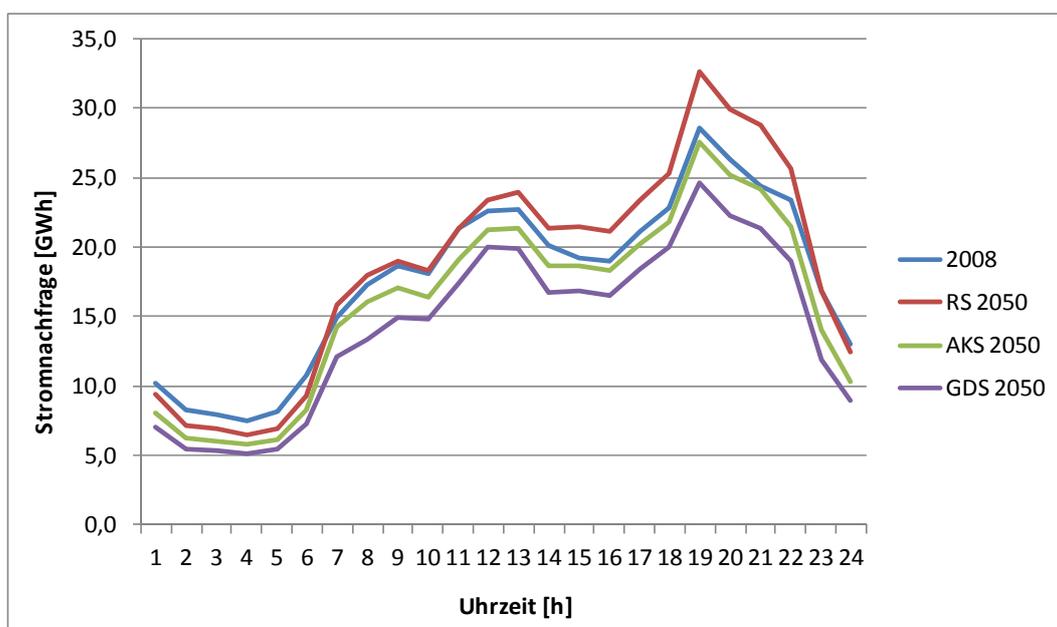


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Lastprofile der Stromnachfrage an einem Werktag im Winter in 2008 vs. 2050 nach Szenarien

6 Schlussfolgerung und Kritische Würdigung

Im Rahmen der technologiebasierten Analyse der Stromnachfrage im Haushaltssektor konnte gezeigt werden, dass durch eine ambitionierte Ausgestaltung (GDS) von energiepolitischen Regularien eine Reduktion der Stromnachfrage um 27 TWh (-19,4 %) bis zum Jahr 2050 erzielt werden kann. Aus einer Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse mit der Stromnachfrage des Haushaltssektors der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung ging hervor, dass der Rückgang der Stromnachfrage im Energiekonzept als äußerst ambitioniert einzustufen ist. Da die Reduzierung der Energie- respektive Stromnachfrage das wesentliche Element zur Erreichung der Klimaschutzziele darstellt, kann aus dieser Untersuchung ein hoher Bedarf für eine kontinuierliche Novellierung von energiepolitischen Regularien wie dem Energiebetriebene Produkte-Gesetz (EBPG) oder der Energieeinsparverordnung (EnEV) abgeleitet werden. Aus der Untersuchung ging des Weiteren hervor, dass es aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Wärmepumpen oder der Steigerung der Energieeffizienz einzelner Technologien zu strukturellen Verschiebungen in der Lastganglinie kommt. Da diese Verschiebungen eine direkte Auswirkung auf den Energieerzeugungssektor mit sich bringen, führt eine reine Skalierung der Lastganglinie in Abhängigkeit der jährlichen Stromnachfrageänderung zu einer systematischen Vernachlässigung von strukturellen Effekten.

Trotz der Vielzahl an vorteilhaften Eigenschaften einer technologiebasierten Analyse der Stromnachfrage ist kritisch anzumerken, dass der Bottom-up-Methodik aufgrund des technologischen Wandels eine Limitation zur Projektion von langfristigen Zeithorizonten immanent ist. Da Langfristszenarien zur Beantwortung von energie- und klimapolitischen Fragestellungen jedoch zunehmend von Relevanz sind, ist hinsichtlich der neuen Anforderungen eine methodische Weiterentwicklungen der Bottom-up-Methodik erforderlich.

7 Literatur

[ADEME, 2011] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie: Odyssee – Energy Efficiency Indicators in Europe, <http://www.odyssee-indicators.org>, abgerufen am 12.01.2012.

[Adnot et al., 2003] Adnot, J.; Riviere, P.; Marchio, D.; Holstrom, M.; Naeslund, J.; Saba, J.; Waide, P.: Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners, Paris, 2003.

[Bhattacharyya et al., 2009] Bhattacharyya, S. C.; Timilsina, G. R.: Energy Demand Models for Policy Formulation – A Comparison Study of Energy Demand Models, Policy Reserach Working Paper, The World Bank, Dundee, Washington, 2009.

[BDEW, 2010a] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes – in Prozent, Berlin, 2010.

[BDEW, 2010b] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: Heizenergie in neuen Wohnungen 1979 bis 2009 – Prozent der Baugenehmigungen, Berlin, 2010.

[Beeck, 1999] Beeck, N.: Classification of Energy Models, Tilburg University und Eindhoven University of Technology (Hrsg.), Tilburg, Eindhoven, 1999.

[Bertoldi et al., 2006] Bertoldi, P.; Atanasiu, B.: Residential Lighting Consumption and Saving Potential in the Enlarged EU. European Commission – DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (Hrsg.), Ispra, 2006.

[Blesl, 2010] Blesl, M.: Raumwärmebedarf und Fernwärmepotenzial der Haushalte in Deutschland bis 2050, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 60. Jg., Heft 8, Essen, 2010.

[BMBF, 2011] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Nachhaltiger Energiekonsum durch intelligente Zähler-, Kommunikations- und Tarifsysteme, Berlin, 2011.

[BMWi et al, 2010] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin, 2010.

[BMWi, 2011a] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung - Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Berlin, 2011.

[BMWi, 2011b] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologien: Endenergieverbrauch nach Energieträgern, <http://bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch.html>, abgerufen am: 15.04.2011.

[Bucher et al., 2011] Bucher, M.; Koch, S.; Andersson, G.: A Dynamic Household Appliance Stock Model for Load Management Introduction Strategies, 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), S. 717-722, Zagreb, 2011.

[Catenazzi, 2009] Catenazzi, C.: Advances in techno-economic energy modeling – Costs, dynamics and hybrid aspects, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2009.

[Chateau et al., 1978] Chateau, B.; Lapillionne, B.: Long-term energy demand forecasting - A new approach, Energy Policy, vol. 6, no. 2, S. 140-157, Grenoble-Cedex, 1978.

[Craig et al., 2002] Craig, P. P.; Gadgil, A.; Koomey, J. G.: What can history teach us? A retrospective examination of long-term energy forecasts for the United States, in: Annual Review Energy Environmental 27, S. 83-118, Kalifornien, 2002.

[EC, 2009] Europäische Kommission: Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries, Final Report, Karlsruhe, 2009.

[EP, 2011] Europäisches Parlament: EU-Glühbirnen-Verbot erregt die Gemüter, <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=IM-PRESS&reference=20090904STO60248&language=DE>, abgerufen am: 16.05.2011.

[EU, 2009] Europäische Union: Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte („Ökodesign-Richtlinie“), Brüssel, 2009.

[EU, 2010] Europäische Union: Richtlinie 2010/30/EU, Kennzeichnung von Haushaltskühlgeräten in Bezug auf den Energieverbrauch, Brüssel, 2010.

[Falkner, 2008] Falkner, H.: Circulators in Buildings (Lot 11), Brüssel, 2008.

[Fonseca et al., 2009] Fonseca, P.; Almeida, A. d.; Feilberg, N.; Markogiannakis, G.; Kofod, C.: Characterization of the household electricity consumption in the EU, potential energy savings and specific policy recommendations, ECEEE 2009 Summer Study, S. 781-793, Coimbra, 2009.

[Forum für Energiemodelle, 2002] Forum für Energiesystemmodelle und energiewirtschaftliche Systemanalyse in Deutschland: Energiemodelle zum Kernenergieausstieg in Deutschland - Effekte und Wirkungen eines Verzichts auf Strom aus Kernkraftwerken, Stuttgart, 2002.

[Fraunhofer IZM, 2007a] Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: EuP Preparatory Studies – Lot 5: Televisions, Berlin, 2007.

[Fraunhofer IZM, 2007b] Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: EuP Preparatory Studies – Lot 6: Standby and Off-Mode Losses, Berlin, 2007.

[Fraunhofer IZM, 2009] Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Berlin, 2009.

[GfK, 2009] Gesellschaft für Konsumforschung: Panelmarkt Germany 2004-2008 – IT-Anwendungen, Nürnberg, 2009.

[GfK, 2010a] Gesellschaft für Konsumforschung: Panelmarkt Deutschland 1998-2000 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefriergerät, Nürnberg, 2010.

[GfK, 2010b] Gesellschaft für Konsumforschung: Panelmarkt Germany 2002-2006 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefriergerät, Kochen, Klimaanlage, Nürnberg, 2010.

[GfK, 2010c] Gesellschaft für Konsumforschung: Panelmarkt Germany 2004-2008 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefriergerät, Kochen, Nürnberg, 2010.

[GfK, 2010d] Gesellschaft für Konsumforschung: Panelmarkt Germany Januar 2008 – April 2009 – Kühlschrank, Nürnberg, 2010.

[GfK, 2011] Gesellschaft für Konsumforschung: ECO Reporting, Nürnberg, 2011.

[Götze, 1993] Götze, U.: Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1993.

[Hansen et al., 2010] Hansen, P.; Matthes, F. Chr. (Hrsg.): Politikszenerarien V – auf dem Weg zum Strukturwandel, Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030, Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Band 62, Jülich, 2010.

[Henning et al., 2011] Henning, M.; Ragwitz, M.; Bürger, V.; Jochem, E.; Kranzl, L.; Schulz, W.: Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie – Bestandsaufnahme und Strukturierung des Wärme- und Kältebereichs, Freiburg, 2011.

[IEA, 2010] International Energy Agency: Energy Technology Perspectives: scenarios & strategies to 2050, Paris, 2010.

[IVF, 2007] IVF: Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs – Lot 3: Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors, Mölndal, 2007.

[IWU et al., 2010] Institut für Wohnen und Umwelt; Bremer Energie Institut: Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Darmstadt, 2010.

[IZT, 2008] Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, Berlin, 2008.

[Kemna et al., 2007] Kemna, R.; Elburg, M. v.; Li, W.; Holsteijn, R. v.: Eco-design of Boilers. Task 3 Report. Consumer Behaviour and Local Infrastructure. Delft, 2007.

[Kirchner et al., 2009] Kirchner, A.; Schlesinger, M.; Weinmann, B.; Hofer, P.; Rits, V.; Wünsch, M.; Koepp, M.; Kemper, L.; Zweers, U.; Straßburg, S.; Matthes, F. Chr.; Busche, J.; Graichen, V.; Zimmer, W.; Hermann, H.; Penninger, G.; Mohr, L.; Ziesing, H.- J.: Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken, Basel, Berlin, 2009.

[Klobasa, 2006] Klobasa, M.: Fraunhofer-ISI-interne Datenbank zu technologiespezifischen Lastprofilen für einzelne Typtage in Sommer und Winter basierend auf Auskünften von verschiedenen Unternehmen und Verbänden zu Lastganglinienverläufen, Karlsruhe, 2006.

[Krimmling, 2007] Krimmling, J: Energieeffiziente Gebäude, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart, 2007.

[Lapillonne et al., 1981] Lapillonne et al.: The MEDEE models for long term energy demand forecasting, in: Socio-Economic Planning Sciences, vol. 15, no. 2, S. 53-58, Grenoble-Cedex, 1981.

[Lefèvre, 2009] Lefèvre, C.: Ecodesign of Laundry Dryers (Lot 16), Final Report, <http://www.ecodryers.org>, abgerufen am 29.7.2009.

[Neuhoff et al., 2011] Neuhoff, K.; Amecke, H.; Novikova, A.; Stelmakh, K.: Thermal Efficiency Retrofit of Residential Buildings: The German Experience, Climate Policy Initiative, Berlin, 2011.

[Nielsen et al., 2007] Nielsen, S. K.; Karlsson, K.: Energy scenarios: a review of methods, uses and suggestions for improvement, International Journal of global Energy Issues, 27, S. 302-322, Roskilde, 2007.

[Normenausschuss Bauwesen, 2003] Normenausschuss Bauwesen: DIN V 4108-6:2003-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003.

[Olonscheck et al., 2011] Olonscheck, M.; Holsten, A.; Kropp, J. P.: Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change, in: Energy Policy 39, S. 4795 – 4806, Potsdam, 2011.

[Passivhaus Institut, 2009] Passivhaus Institut: Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten, Darmstadt, 2009.

[Prognos, 2007] Prognos AG: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen, Basel, Berlin, 2007.

[Prognos et al, 2010] Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung mbg (GDS): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, Basel, Köln, Osnabrück, 2010.

[Schimschar et al., 2011] Schimschar, S.; Blok, K.; Boermans, T.; Hermelink, A.: Germany's path towards nearly zero-energy buildings – Enabling the greenhouse gas mitigation potential in the building stock, in: Energy Policy 39, S. 3346 – 3360, Köln, Utrecht, Berlin, 2011.

[Schlomann et al., 2004] Schlomann, B.; Gruber, E.; Eichhammer, W.; Kling, N.; Diekmann, J.; Ziesing, H.-J., Rieke, H.; Wittke, F.; Herzog, T.; Barbosa, M.; Lutz, S.; Broeske, U.; Merten, D.; Falkenberg, D.; Nill, M.; Kaltschmitt, M.; Geiger, B.; Kleeberger, H.; Eckl, R.: Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Karlsruhe, Berlin, Nürnberg, Leipzig, München, 2004.

[Seefeldt et al., 2010a] Seefeldt, F.; Schlomann, B.; Eichhammer, W.; Weinert, K.: Berechnung und Meldung von Endenergieeinsparungen im Rahmen der EU Energiedienstleistungsrichtlinie, Berlin, Karlsruhe, 2010.

[Seefeldt et al., 2010b] Seefeldt, F.; Wunsch, M.; Schlomann, B.; Fleiter, T.; Gerspacher, A.; Geiger, B.; Kleeberger, H.; Ziesing, H.-J.: Interne Studie zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, Karlsruhe, 2010.

[StBA, 2006] Statistisches Bundesamt: Bauen und Wohnen: Mikrozensus – Zusatzerhebung 2006 Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte, Fachserie 5, Heft 1, Wiesbaden, 2006.

[StBA, 2009] Statistisches Bundesamt: Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Wiesbaden, 2009.

[SW Mainz, 2011a] Stadtwerke Mainz: Synthetisches Lastprofil für Elektrospeicherheizungen im Netzgebiet der Stadtwerke Mainz AG, Mainz, 2011.

[SW Mainz, 2011b] Stadtwerke Mainz: Synthetisches Lastprofil für Wärmepumpen im Netzgebiet der Stadtwerke Mainz AG, Mainz, 2011.

[SW Mainz, 2011c] Stadtwerke Mainz: Synthetisches Lastprofil für Direktheizungen im Netzgebiet der Stadtwerke Mainz AG, Mainz, 2011.

[UBA, 2010] Umweltbundesamt: Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte, Wuppertal, Dortmund, 2010.

[VITO, 2009] VITO: Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs (Lot 19): Domestic Lighting, Mol, 2009.

[Voß, 2004] Voß, W.: Taschenbuch der Statistik, Carl Hanser Verlag, München, 2004.

[Voss, 2009] Voss, K.: Nullenergiehaus, Plusenergiehaus, Nullemissionshaus – Was steckt dahinter und wie gelingt die Umsetzung?, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2009.

[WEC, 2011] World Energy Council: Energie für Deutschland 2011 – Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext, Weltenergieerat – Deutschland e.V. (Hrsg.), Berlin, 2011.

[Wietschel et al. 2011] Wietschel, M.; Fleiter, T.; Hirzel, S.: Modellierung der Energienachfrage – der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien, in:

Energieszenarien: Konstruktion, Bewertung und Wirkung – „Anbieter“ und „Nachfrager“ im Dialog, KIT Scientific Publishing, S. 41-52, Karlsruhe, 2011.

[Wilson et al., 1993] Wilson, D.; Swisher, J.: Exploring the gap - Top-down versus bottom-up analyses of the cost of mitigating global warming, Energy Policy March, Lund, 1993.

[WK OÖ, 2011] Wirtschaftskammer Oberösterreich: Standardisierte Lastprofile, Linz, 2011.

[ZVEI et al., 2009] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie; Gesellschaft für Konsumforschung: Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarktes 2006-2009, Frankfurt, 2009.