

Der Rebound-Effekt:

Theoretische und empirische Analyse am Beispiel der Heizung in privaten Haushalten

Zwölfwöchige Abschlussarbeit im Rahmen der Prüfungen im Studiengang
Bachelor in Volkswirtschaftslehre an der Universität Göttingen.

Vorgelegt am:	08.03.2013
Von:	Jasmin Egloff
Matrikelnummer:	20959534
Aus:	Tuttlingen
Prüfer:	Professor Robert Schwager

Danksagung

Diese Abschlussarbeit ist aus meiner Tätigkeit als Praktikantin am Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) in Mannheim entstanden, in deren Rahmen ich an dem Forschungsprojekt „REBOUND – Die soziale Dimension des Rebound-Effekts“ mitarbeiten durfte. Im Rahmen des REBOUND- Projektes unter der Projektnummer 01UV1002A wurde diese Abschlussarbeit unterstützt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Für hilfreiche Kommentare und Anregungen während der Entstehung dieser Abschlussarbeit möchte ich mich insbesondere bei Herrn Professor Robert Schwager und Herrn Martin Achtnicht bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1. Klimapolitik, Energieeffizienz und der Rebound-Effekt	1
2. Der Rebound-Effekt: Energieeffizienz aus ökonomischer Perspektive	4
2.1. Der direkte Rebound-Effekt: Definition	4
2.2. Der direkte Rebound-Effekt des Haushaltes im Zwei-Güter-Modell	5
2.2.1. Die Slutsky-Zerlegung des Preiseffektes	8
2.2.2. Elastizitäten zur Berechnung des direkten Rebound-Effektes	12
2.2.3. Grenzen des Modells	15
2.3. Weitere Dimensionen des Rebound-Effektes	16
3. Heizung in privaten Haushalten - Eine empirische Analyse	18
3.1. Die Datengrundlage	19
3.2. Die Regressionsmodelle	20
3.2.1. Beschreibung der Variablen	21
3.2.2. Ergebnisse der Schätzung	23
3.2.3. Die Güte der geschätzten Modelle	28
3.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse	32
4. Energieeffizienz in der Klimapolitik - Eine Bilanz	34
A. Herleitung der Slutsky-Zerlegung	37
B. Definition des Klimafaktors	39
Literaturverzeichnis	40

Abbildungsverzeichnis

2.1. Ausgangsentscheidung und Gesamteffekt der Preissenkung von Gut s_1	6
2.2. Substitutionseffekt durch Preissenkung von Gut s_1	7
2.3. Positiver Einkommenseffekt (Normales Gut)	9
2.4. Negativer Einkommenseffekt (Inferiores Gut)	10

Tabellenverzeichnis

3.1. Kurzbeschreibung der Variablen	22
3.2. Modellschätzungen mit der Methode der Kleinsten Quadrate	24
3.3. Korrelationskoeffizienten	31

Abkürzungsverzeichnis

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

BLUE Best Linear Unbiased Estimator, dt. bester linearer unverzerrter Schätzer

EE Einkommenseffekt der Slutsky-Zerlegung

GE Gesamteffekt einer Veränderung des Preises

OLS Ordinary Least Squares, dt. Methode der Kleinsten Quadrate

SE Substitutionseffekt der Slutsky-Zerlegung

1. Klimapolitik, Energieeffizienz und der Rebound-Effekt

In der Klima- und Umweltpolitik Deutschlands wird Energieeffizienz als politisches Ziel zur Einsparung von CO₂-Emissionen gesehen, da auf ihr die Hoffnung ruht, den Energieverbrauch und damit auch die CO₂-Emissionen senken zu können (BMU, 2012). Energieeffizienz wird als sogenannten „free lunch“ gesehen, durch den sowohl unpopuläre Politiken, wie beispielsweise die Besteuerung von Energie, vermieden werden können als auch wirtschaftlicher Nutzen realisiert werden kann (Brookes, 2000, S. 355; Van den Bergh, 2011, S. 44). Auch das deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) verbindet mit Energieeffizienz ausschließlich positive Effekte: Neben einer Senkung der Freisetzung klimaschädlichen Kohlendioxids, es werden weitere positive Effekte wie eine geringere Abhängigkeit von Energieimporten und die Minderung von Energieverteilungskonflikten erwartet. Ziel ist es, den Primärenergieverbrauch bis 2020 um 20% und bis 2050 um 50% zu senken. Im Gebäudebereich soll der Heizenergieverbrauch bis 2020 um 20% und der Verbrauch von Primärenergie bis 2050 um 80% gesenkt werden. Darüber hinaus soll der Gebäudebestand bis dahin nahezu klimaneutral sein und die Verdopplung der energetischen Sanierungsrate auf 2% pro Jahr erreicht werden (BMU, 2012).

Aber wie effektiv ist Energieeffizienz für die Reduktion des Energieverbrauchs tatsächlich? Können diese ehrgeizigen Ziele zur Reduktion des Heizenergieverbrauchs mithilfe von Energieeffizienz erreicht werden? Bei diesen Fragen wird in der ökonomischen Forschung das Konzept des Rebound-Effektes diskutiert, aufgrund dessen angezweifelt wird, dass technisch vorhergesagte Einsparpotentiale der Energieeffizienz tatsächlich realisiert werden können. Jevons (1865) war vermutlich der Erste, der sich in seinem Buch „The Coal Question“ mit der Frage auseinandersetzte, wie sich effizientere Technologien für Kohle auf die Nachfrage nach Kohle auswirken. Zu seiner Zeit wurde die Endlichkeit der Kohlereserven als Bedrohung für den Wohlstand dieses „Zeitalters der Kohle“ wahrgenommen und so Hoffnungen in effizientere Technologien gesetzt, um die Erschöpfung der Reserven zu vermeiden. Jevons Hypothese war jedoch, dass durch die Effizienzsteigerung die nachgefragte Menge nach Kohle nicht gesenkt, sondern gesteigert wird. Kohle könne profitabler eingesetzt werden und daher würde eine höhere Menge an Kohle nachgefragt. Dies würde dazu führen, dass die Kohlereserven Großbritanniens nicht geschont, sondern im Gegenteil noch schneller ausgebeutet würden (Jevons, 1865, S. 1ff). Dies wird „Jevons’ Paradox“ oder auch „backfire“ genannt.

Unter Energie- und Umweltökonom¹ gibt es seit den 1980ern eine rege Diskussion, wie sich Energieeffizienz unter Berücksichtigung ökonomischer Verhaltensänderungen tatsächlich auf die Nachfrage nach Energie auswirkt. Zunächst griffen Brookes (1978) und Khazzoom (1980) die Gedanken von Jevons wieder auf und wendeten diese auf die Diskussion zur Energieeffizienz an. Energieeffizienz müsse nicht zwangsläufig dazu führen, dass Energie eingespart wird. Durch Effizienz sinkt der effektive Preis von Energie. Ausgehend vom technisch möglichen Energieeinsparpotential, könne eine Preisreduktion dazu führen, dass dieses Einsparpotential nur teilweise realisiert wird, der Rebound-Effekt. Das technisch mögliche Einsparpotential ist dabei die Menge an Energie, die eingespart werden könnte, wenn sich die nachgefragte Menge einer Energiedienstleistung nach einer Effizienzsteigerung nicht verändert. Es wäre sogar denkbar, dass durch die Preissenkung von Energie die Nachfrage nach Energie so stark steigt, dass die nachgefragte Menge nach der Effizienzverbesserung über der vorher nachgefragten Menge läge (Khazzoom, 1980, S. 22). Das Konzept des Rebound-Effektes wird auch Khazzoom-Brookes Postulat genannt (Brookes, 2000, S. 440).

Das Konzept des Rebound-Effektes hat bis heute nichts an seiner Brisanz verloren, sollen die oben beschriebenen Klimaschutzziele mithilfe von Energieeffizienz erreicht werden. Selbst wenn die Nachfrage nach Energie aufgrund einer Effizienzsteigerung nicht steigt, ist es möglich, dass Verhaltensänderungen dazu führen, dass technische Einsparpotentiale nicht in vollem Umfang realisiert werden (Van den Bergh, 2011, S. 52). Eine genaue Untersuchung der Auswirkungen von Energieeffizienz auf die Konsumententscheidungen eines Haushaltes kann bei der Bewertung von des Politikinstrument Energieeffizienz helfen.

In der vorliegenden Abschlussarbeit soll untersucht werden, ob es Hinweise auf die Existenz eines Rebound-Effektes für Heizung in privaten Haushalten auf theoretischer und empirischer Ebene gibt. Raumwärme spielt in privaten Haushalten neben Transport eine herausgehobene Rolle im Energieverbrauch und ist daher relevant für eine Untersuchung von Energieeinsparpotentialen in privaten Haushalten. So entfielen in deutschen Haushalten 2011 laut Berechnungen des Statistischen Bundesamtes (2012a) rund 70% des gesamten Energieverbrauchs im Haushalt auf das Heizen². Außerdem verbrauchen private Haushalte immer weniger Energie. Obwohl die Wohnfläche von 2005 bis 2011 um 3.3% und die Anzahl der Haushalte um 4.0% gestiegen ist, sank der Energieverbrauch für Raumwärme ausgehend für den Zeitraum 2005 bis 2011 um 13.4%. Für denselben Zeitraum sank der gesamte Energieverbrauch in Haushalten um 10.3% (Statistisches Bundesamt, 2012a).

In dieser Abschlussarbeit sollen zunächst die theoretischen Grundlagen der neoklassischen Haushaltstheorie angewendet werden, um die Mechanismen zu beschreiben, die dazu führen können, dass das technische Einsparpotential durch Energieeffizienz nicht realisiert wird. Nach einer ausführlichen Definition des Rebound-Effektes soll der Rebound-Effekt im Zwei-Güter-Modell analytisch begründet werden. Außerdem wird auf die Rolle der Elastizitäten bei der Berechnung

¹Die weibliche Form ist der männlichen Form in dieser Abschlussarbeit gleichgestellt; lediglich aus Gründen der Vereinfachung wurde die männliche Form gewählt.

²Die anderen Kategorien waren Beleuchtung, Warmwasser, Kochen, Trocknen, Bügeln und andere Haushaltsgeräte (inklusive Kommunikation).

dieses Effektes eingegangen. Im zweiten Teil soll mithilfe einer Regressionsanalyse am Beispiel der Heizung in privaten Haushalten untersucht werden, ob ein Rebound-Effekt empirisch bestätigt werden kann. Des Weiteren wird untersucht, ob Energieeffizienz tatsächlich dazu führt, dass der Heizenergieverbrauch eines Haushaltes steigt oder ob nicht ein besonders hoher Verbrauch dazu führt, dass eher in eine effizientere Ausstattung investiert wird. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der empirischen Analyse und ihre Relevanz diskutiert. Daneben sollen die Konsequenzen eines Rebound-Effektes für die Verfolgung klimapolitischer Ziele mithilfe von Energieeffizienz diskutiert werden.

2. Der Rebound-Effekt: Energieeffizienz aus ökonomischer Perspektive

Zunächst wird die Definition des direkten Rebound-Effektes beschrieben und diskutiert (2.1), um dann mithilfe des Zwei-Güter-Modells die Wirkungsmechanismen einer Preisveränderung darzustellen (2.2). Dabei wird insbesondere auf die Slutsky-Zerlegung mit Substitutions- und Einkommenseffekt, die Rolle der Elastizitäten zur Berechnung des Rebound-Effektes und die Grenzen des Zwei-Güter-Modells eingegangen. Im Abschnitt 2.3 werden noch kurz drei weitere Dimensionen des Rebound-Effektes beschrieben: der indirekte Effekt, der gesamtwirtschaftliche Effekt und der Transformationseffekt.

2.1. Der direkte Rebound-Effekt: Definition

Im Folgenden wird der Typologie des Rebound-Effektes gefolgt, die Greening et al. (2000) zusammengefasst haben. Dabei findet diese Typologie Anwendung für Energiedienstleistungen und nicht für die Nachfrage nach Energie direkt. Dies liegt an der Annahme, dass Haushalte keinen Nutzen aus dem Konsum von Energie realisieren, sondern vielmehr aus dem Konsum von Dienstleistungen (wie z.B. Kühlschränke, Auto fahren, mit dem Herd kochen). Eine Definition und Abgrenzung von solchen Energiedienstleistung ist dabei schwierig (Greening et al., 2000, S. 390), da die meisten Dienstleistungen Energie in irgendeiner Weise benötigen und lediglich der Anteil an den Gesamtkosten variiert (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 637). Die wichtigste Eigenschaft der Energiedienstleistung ist dabei die Produktion von Nutzarbeit³. Energiedienstleistungen bestehen außerdem auch aus weiteren Attributen, wie z.B. Beschleunigung, Komfort und Prestige eines Autos (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 638).

Energieeffizienzsteigerungen einer Energiedienstleistung führen dazu, dass weniger Energie zur Bereitstellung derselben Menge dieser Dienstleistung benötigt wird. Durch die Effizienzsteigerungen sinkt also der effektive Preis einer Energiedienstleistung und führt dazu, dass die Nachfrage von Haushalten nach der Energiedienstleistung stimuliert wird. Das technische Einsparpotential eines effizienteren Geräts wird aufgrund einer Verhaltensänderungen nicht erreicht. Dies ist der direkte Rebound-Effekt. Durch erhöhte Energieeffizienz kann dieselbe Menge einer Energiedienstleistung, z.B. das Brennen einer Glühbirne für eine bestimmte Dauer, *ceteris paribus*, mit weniger Energieaufwand bereitgestellt werden. Der effektive Preis der Energiedienstleistung sinkt

³Nutzarbeit stellt die Arbeit dar, die man von einem System unter Berücksichtigung des Umgebungsdrucks erhält. Arbeit ist dabei die Leistung, die mithilfe von Energie über eine bestimmte Zeit geflossen ist (Labuhn und Romberg, 2009, S. 54 und 65f).

und somit steigt die Nachfrage nach dieser Dienstleistung in der Regel (Khazzoom, 1980, S. 25; Greening et al., 2000, S. 390). Ein Beispiel hierfür ist, dass nach dem Kauf eines effizienteren Diesel-Autos mehr gefahren wird. Das effizientere Auto wird auch für die Strecke zum Bäcker an der Ecke genutzt, die vor dem Kauf noch zu Fuß gegangen wurde. Wie dies aus ökonomischer Sicht zu begründen ist, wird im folgenden Unterkapitel mithilfe der mikroökonomischen Theorie (2.2) genauer beschrieben.

Allgemein kann man vier Faktoren unterscheiden, in denen der Verbrauch ansteigen kann: die Anzahl der Geräte (für Dienstleistungen), durchschnittliche Größe, durchschnittliche Benutzung und durchschnittlicher Auslastungsgrad (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. 7). Zum Beispiel könnten die Haushalte durch Effizienzsteigerungen mehr Kühlschränke und/oder größere Kühlschränke kaufen, während der Ferien nicht mehr ausschalten und/oder durchschnittlich weniger Güter im Verhältnis zum Volumen des Kühlschranks kühlen. Ein zusätzlicher Faktor könnte der 'marginale Konsument' sein. Damit ist ein Haushalt gemeint, der sich erst durch die Effizienzsteigerung (und damit durch eine Preissenkung) eine bestimmte Dienstleistung leisten kann. Für Deutschland ist ein Effekt durch marginale Konsumenten im Bereich Heizung kaum zu erwarten, da durch soziale Sicherungssysteme staatliche Unterstützung für Heizung bereitgestellt wird (Madlener und Hauertmann, 2011, S. 7).

2.2. Der direkte Rebound-Effekt des Haushaltes im Zwei-Güter-Modell

Im Folgenden soll das Zwei-Güter-Modell für Energiedienstleistungen betrachtet werden, das nach dem Vorbild von Binswanger (2001) dargestellt wird. Die zentrale Untersuchung liegt auf der Untersuchung des Preiseffektes mithilfe der Slutsky-Zerlegung, die den Preiseffekt in einen Substitutions- und einen Einkommenseffekt zerlegt. Binswanger (2001) greift bei seiner Analyse auf den Hicks-Substitutionseffekt zurück, nennt aber keine Gründe, warum diese der Zerlegung nach Slutsky, also unter Konstanthaltung der Kaufkraft, vorzuziehen ist. Die Substitutionseffekte der beiden Zerlegungen nähern sich für infinitesimal kleine Preisänderungen aneinander an (Varian, 2010, S. 155). Im Folgenden wurde hier die Slutsky-Zerlegung unter Konstanthaltung der Kaufkraft durchgeführt. Weiterhin soll der Einfluss der Substituierbarkeit zwischen Gütern auf die Größe des Rebound-Effektes untersucht werden und die Grenzen des Zwei-Güter-Modells aufgezeigt werden.

Modell mit zwei Dienstleistungen

Wenn eine bestimmte Energiedienstleistung effizienter wird, kann dies, wie bereits in 2.1 beschrieben, als eine Senkung des effektiven Preises aufgefasst werden. Dieselbe Dienstleistung kann zu einem geringeren Aufwand an Energie und damit zu geringeren Kosten produziert werden. Effi-

zienstärkerungen bewirken also, dass die Kosten pro Einheit einer Energiedienstleistung gesenkt werden. Die Effekte, die daraus resultieren, sollen mithilfe der neoklassischen Theorie dargestellt werden.

In dieser wird davon ausgegangen, dass ein Haushalt rational entscheidet und seinen Nutzen maximiert. Dazu müssen für die Präferenzen des Haushalts einige Voraussetzungen erfüllt sein: Verschiedene Güterbündel können miteinander verglichen werden und in eine Präferenzordnung zueinander gesetzt werden (Vollständigkeit) und jedes Bündel ist mindestens so gut wie ein identisches Bündel (Reflexivität). Der Haushalt kann verschiedene Alternativen z.B. Güter immer entsprechend seiner Präferenzen in eine Rangfolge bringen (Transitivität). Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass es dem Haushalt immer mehr Nutzen stiftet, mehr zu konsumieren; es gibt also keinen Sättigungspunkt. Ferner verfügt der Haushalt über vollständige Informationen und keine Unsicherheit (vgl. Berkhout et al., 2000, S. 426; Varian, 2004, S. 33f).

In dem Modell gibt es zur Vereinfachung zwei Güter, die Energiedienstleistung Heizung s_1 und alle anderen Güter s_2 . Der Haushalt strebt nach Nutzenmaximierung, d.h. er möchte mit seinem gegebenen Budget möglichst viel Nutzen realisieren. Seine Nutzenfunktion beschreibt, wie viel

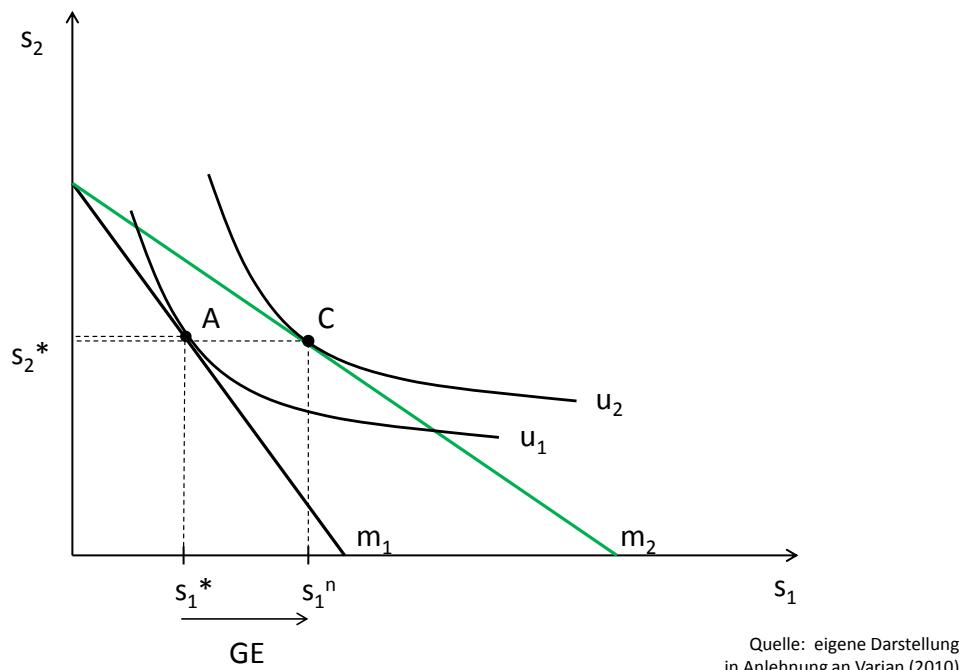
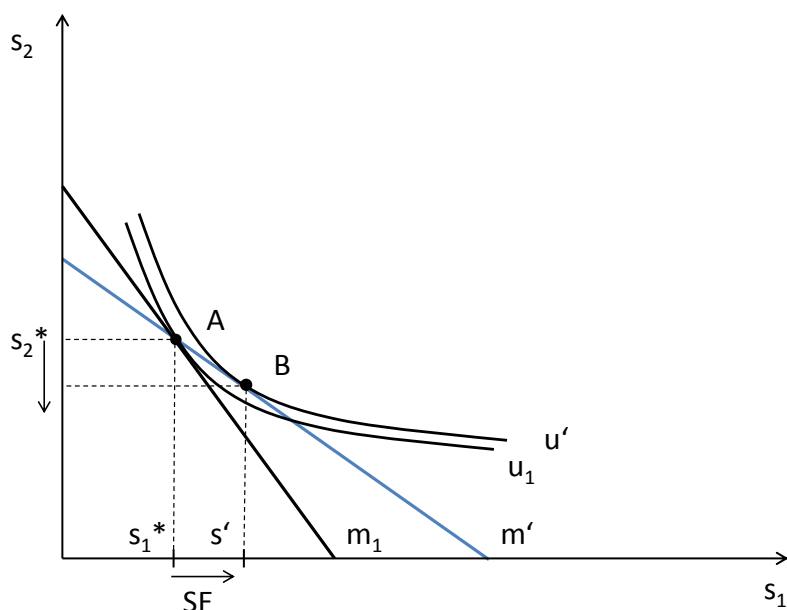


Abbildung 2.1.: Ausgangsentscheidung und Gesamteffekt der Preissenkung von Gut s_1

Nutzen der Haushalt für beliebige Konsumbündel (also eine beliebige Mengenkombination aus Gut 1 und Gut 2) realisiert. Die Nutzenfunktion $u(s_1, s_2)$ hängt von den beiden Dienstleistungen s_1 und s_2 ab. Außerdem ist der Haushalt durch eine Budgetrestriktion $m = p_1 s_1 + p_2 s_2$ beschränkt, in der p_1 und p_2 die Preise der Dienstleistungen darstellen und m das fixe Haushaltsbudget ist, das für Heizung (s_1) und alle anderen Güter (s_2) vollständig ausgegeben wird.

Abbildung 2.1 zeigt die Ausgangsentscheidung A des Haushaltes zu dem gegebenen Budget m_1 . Der Haushalt wählt A als das optimale Güterbündel und konsumiert s_1^* Einheiten von s_1 und s_2^* Einheiten von s_2 . Die Indifferenzkurve u_1 tangiert die Budgetgerade in A , der Haushalt kann mit dem gegebenen Budget m_1 den höchsten Nutzen realisieren (vgl. Berkhout et al., 2000, S. 427; Varian, 2010, S. 73ff).

Ausgehend von dieser Situation soll nun die Energieeffizienz der Heizung (s_1) erhöht werden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass diese Steigerung exogen⁴ gegeben ist. Sie erlaubt eine Stunde Heizung mit weniger Energieaufwand bereitzustellen und damit die Kosten pro Einheit Heizung zu senken. Der effektive Preis für das Heizen s_1 sinkt auf p'_1 und damit dreht sich die



Quelle: eigene Darstellung
in Anlehnung an Varian (2010)

Abbildung 2.2.: Substitutionseffekt durch Preissenkung von Gut s_1

Budgetgerade entlang der s_1 -Achse nach außen (Abb. 2.1). Der Haushalt kann, wenn er sein ganzes Budget für Heizung ausgibt $m_2 = \frac{m}{p'_1}$ Einheiten Heizung konsumieren. Abbildung 2.1 zeigt, dass mit dem neuen Budget m_2 die Nachfrage nach Heizung von s_1^* auf s_1^n steigt. Das ist intuitiv nachvollziehbar: Die nachgefragte Menge steigt, wenn der Preis sinkt bzw. sinkt die Nachfrage, wenn der Preis steigt. Dies muss jedoch nicht immer der Fall sein (Binswanger, 2001, S. 125ff). Der Haushalt realisiert damit auch ein höheres Nutzenniveau u_2 (Varian, 2010, S. 73ff). Die Slutsky-Zerlegung hilft dabei, die Auswirkung einer Preisänderung als Ergebnis zweier, manchmal gegenläufiger Effekte zu verstehen. Denn durch eine Preisänderung verändert sich sowohl das Tauschverhältnis zwischen zwei Gütern als auch die Kaufkraft des Einkommens (Varian, 2010, S. 137f). Daher wird der Preiseffekt in einen Substitutions- und einen Einkommenseffekt unterteilt

⁴Die Energieeffizienzsteigerung wird nicht von anderen Faktoren, wie zum Beispiel den Preis der Energie beeinflusst. In Abschnitt 2.2.3 wird noch kurz auf die endogene Bestimmung eingegangen.

(2.2.1). In einem Modell mit zwei oder mehr Gütern hängt die Gesamtveränderung der Nachfrage außerdem von der Substitutierbarkeit der beiden Güter ab, auf die auch kurz eingegangen wird.

2.2.1. Die Slutsky-Zerlegung des Preiseffektes

Substitutionseffekt

Wenn der Preis (p_1) sinkt, dann wird Gut s_1 relativ billiger im Vergleich zu Gut s_2 . Das Tauschverhältnis zwischen den beiden Gütern hat sich so verändert, dass man weniger von Gut s_2 aufgeben muss, um eine weitere Einheit von Gut s_1 zu bekommen als zuvor. Die Kaufkraft wird hier konstant gehalten. Grafisch dreht sich die Budgetgerade, bis die Steigung dem neuen Preisverhältnis $-\frac{p_1'}{p_2}$ entspricht (2.2). Da die Kaufkraft zunächst konstant gehalten werden soll, verläuft die Budgetgerade m' weiterhin durch den Ausgangskonsumpunkt A . Dies wird auch in Abbildung 2.2 dargestellt. Aufgrund des Substitutionseffektes (SE) wird die Menge von s_1 von s_1^* auf s_1' steigen. Der Substitutionseffekt führt also dazu, dass die nachgefragte Menge nach Gut s_1 steigt, wenn der Preis sinkt. Dies ist immer der Fall: Der Substitutionseffekt verläuft immer in die entgegengesetzte Richtung der Preisbewegung, d.h. wenn der Preis p_1 sinkt, steigt die Nachfrage des Gutes s_1 aufgrund des Substitutionseffektes (Varian, 2010, S. 137ff).

Einkommenseffekt

Durch eine Preisänderung von Gut s_1 verändert sich neben dem relativen Preisverhältnis auch die Kaufkraft des Haushaltes. Durch einen gesunkenen Preis, wie hier bei Energieeffizienz, steigt nun die Kaufkraft des Haushaltes. Er muss für dieselbe Menge von Gut s_1 weniger Geld aufwenden und wird daher das zusätzlich zur Verfügung stehende Einkommen verwenden, um mehr von Gut s_1 und/oder Gut s_2 zu konsumieren. Intuitiv würde mit steigendem Einkommen die Nachfrage nach Gut s_1 steigen. Dies ist bei normalen Gütern der Fall: Mit steigendem Einkommen steigt die Nachfrage und umgekehrt sinkt die Nachfrage mit sinkendem Einkommen. Jedoch ist auch denkbar, dass trotz höherem Einkommen weniger von diesem Gut konsumiert wird. Ein solches Gut wird inferior genannt. Ein übliches Beispiel hierfür ist Haferschleim. Umso mehr ein Haushalt verdient, desto weniger Haferschleim wird er konsumieren, da er sich auch zunehmend stärker präferierte Lebensmittel leisten kann. Inferiorität ist meist vom Einkommensniveau abhängig, von dem man ausgeht. Ausgehend von einem sehr geringen Einkommen wird der Haushalt mit steigendem Einkommen mehr Haferschleim konsumieren, ab einem gewissen Einkommen aber weniger nachfragen, da dann Haferschleim mit Trauben-Nuss-Müsli o.ä. ersetzt werden kann (Binswanger, 2001, S. 125ff; Varian, 2010, S. 136ff).

Abbildung 2.3 zeigt den Einkommenseffekt (EE), wenn Heizung s_1 ein normales Gut ist. Unter Berücksichtigung der gestiegenen Kaufkraft steigt die Nachfrage nach Gut s_1 noch weiter an. Substitutions- und Einkommenseffekt führen also beide zu einer Erhöhung der optimalen Nachfrage nach Heizung s_1 , daher ist der Gesamteffekt des gesunkenen Preises eine gestiegene Nachfrage nach Gut s_1 .

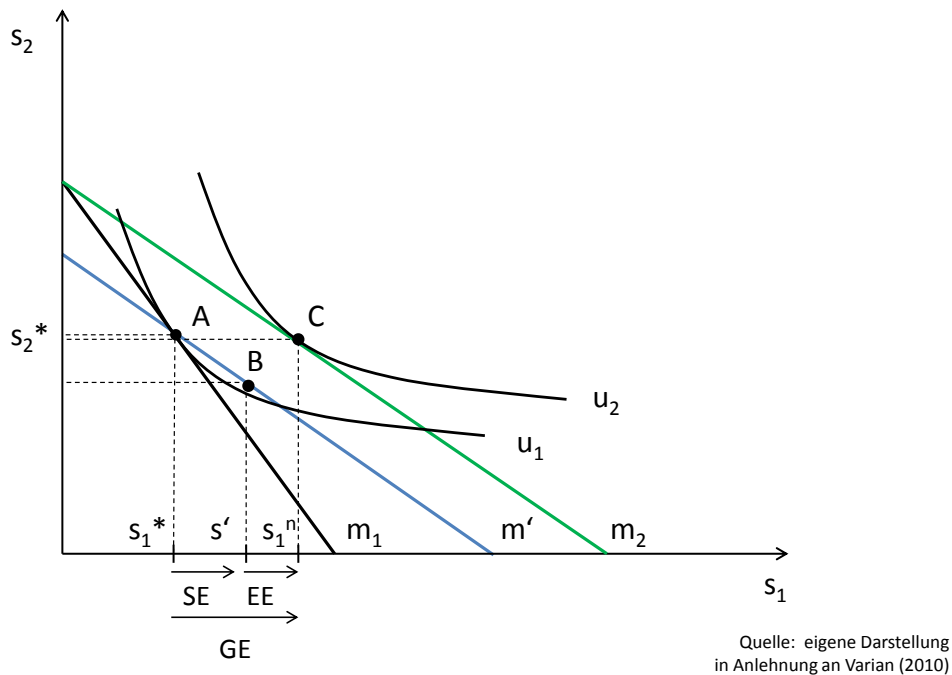


Abbildung 2.3.: Positiver Einkommenseffekt (Normales Gut)

Abbildung 2.4 stellt den Einkommenseffekt bei einem inferioren Gut dar. Aufgrund des gestiegenen Einkommens sinkt die Nachfrage nach Heizung s_1 . Der Einkommenseffekt wirkt also in die entgegengesetzte Richtung des Substitutionseffektes und führt dazu, dass die Richtung des Gesamteffektes (GE) nicht mehr eindeutig ist. In Abbildung 2.4 steigt die nachgefragte Menge nach Heizung s_1 im Gesamteffekt aufgrund der Preissenkung. Wenn der entgegengesetzte Einkommenseffekt den Substitutionseffekt überwiegt, könnte der Gesamteffekt auf eine Preissenkung negativ sein, d.h. ein steigender Preis hätte eine steigende Nachfrage zur Folge und umgekehrt. In diesem Fall handelt es sich um ein Giffen-Gut. Dies ist jedoch schwer zu fassen und kommt selten vor, sodass an dieser Stelle auf eine tiefer gehende Analyse dieses Falles verzichtet wird (vgl. Binswanger, 2001, S. 125f; Varian, 2004, S. 95f und 141ff).

Für Raumwärme in Haushalten kann man argumentieren, dass dieses Gut ein normales Gut ist. Mit steigendem Einkommen kann die Raumwärme gesteigert werden, um die als komfortabel empfundene Raumwärme zu realisieren. Außerdem könnte die Fläche und Dauer der Beheizung gesteigert werden. Es wäre dabei auch möglich, dass die Nachfrage nach Heizenergie mit steigendem Einkommen mit einem immer geringeren Zuwachs nachgefragt wird. Eine zusätzliche Einheit Raumwärme könnte dem Haushalt immer weniger Nutzen stiften, also einen abnehmenden Grenznutzen haben (Madlener und Hauertmann, 2011, S. 7). Außerdem haben Milne und Boardman (2000, S. 411) für Großbritannien herausgefunden, dass die Temperatur nach Effizienzmaßnahmen umso stärker erhöht wurde, je geringer die Ausgangstemperatur vor der Modernisierung war. Ab 20°C Ausgangstemperatur wurde die Innentemperatur auch durch hö-

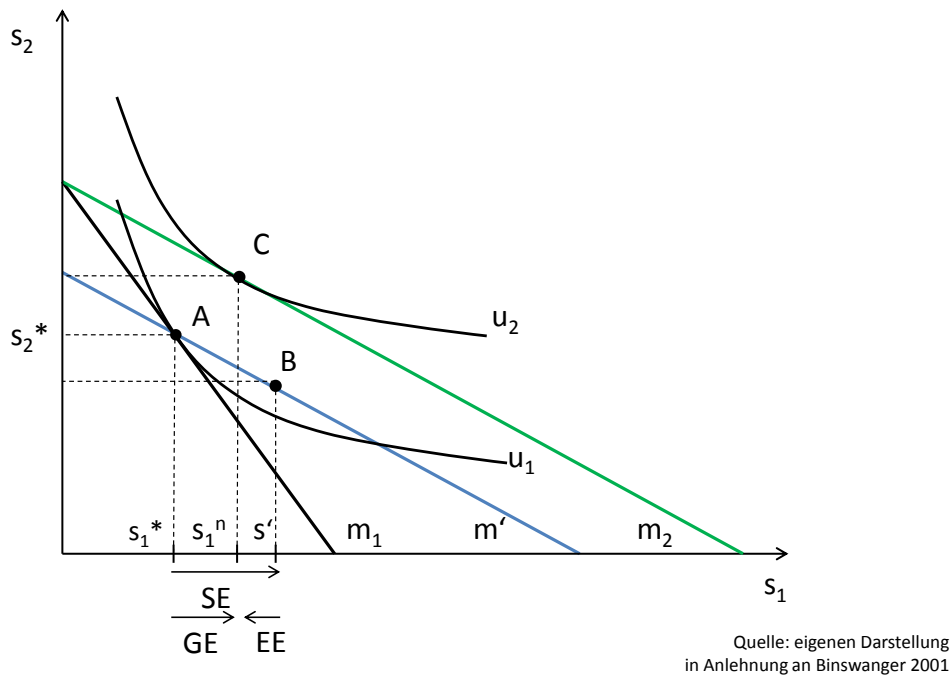


Abbildung 2.4.: Negativer Einkommenseffekt (Inferiores Gut)

here Effizienz nicht mehr erhöht. Als Hypothese könnte auch aufgestellt werden, dass es beim Heizen in Haushalten auch einen Sättigungspunkt gibt. Dies kann allerdings in der Theorie nicht berücksichtigt werden.

Dass die Nachfrage des Gutes Heizung aufgrund eines gestiegenen Einkommens sinkt, also inferior ist, ist auf theoretischer Ebene weniger leicht zu begründen (vgl. Binswanger, 2001, S. 126). Ein denkbare Szenario wäre hier, dass der Haushalt sich mit steigendem Einkommen weniger zu Hause aufhält, da die Haushaltsmitglieder mehr arbeiten und/oder immer öfter in den Urlaub fahren. Dann würde zumindest der eigene, selbst bezahlte Anteil an der konsumierten Raumwärme sinken, da beispielsweise die Kosten für Raumwärme im Büro vom Arbeitgeber bezahlt werden.

Wie beschrieben wurde, kann die Nachfrage eines Haushaltes aufgrund einer Preissenkung steigen und sinken, genauso wie die Nachfrage sinken oder steigen kann, wenn das Einkommen steigt. Was ist aber nun das Ergebnis dieser Analyse? Der Gehalt ist das Gesetz der Nachfrage: Wenn die Nachfrage nach einem Gut steigt, wenn das Einkommen steigt, dann muss die Nachfrage nach diesem Gut sinken, wenn der Preis steigt. Dies ist ein normales Gut. Substitutionseffekt und Einkommenseffekt gehen in dieselbe Richtung und eine Preissteigerung führt unausweichlich zu einer niedrigeren Nachfrage (Varian, 2010, S. 147). Dies ist in Abb. 2.3 abgebildet.

Substituierbarkeit

Bisher wurde der Substitutions- und den Einkommenseffekt nach einer Preisänderung betrachtet. An dieser Stelle soll nun noch auf die Substituierbarkeit zwischen den beiden Gütern s_1 und s_2 eingegangen werden, da sie bestimmt, wie groß der Substitutionseffekt ausfällt. Ist die Substituierbarkeit zwischen zwei Gütern sehr hoch, so ist auch der Substitutionseffekt sehr groß, wie in Abb. 2.4 dargestellt. Kann ein Gut kaum mit einem anderen Gut substituiert werden, so ist der Substitutionseffekt gering, vgl. Abb. 2.3 (Binswanger, 2001, S. 125f).

Wenn im Falle zweier Güter, die sich wie vollkommene Substitute zueinander verhalten, der Preis des Gutes s_1 relativ günstiger zum Preis des Gutes s_2 wird, so wird nur noch das billigere Gut s_1 konsumiert, da es s_2 substituiert. Handelt es sich jedoch um komplementäre Güter, so werden die beiden Güter optimalerweise immer in einem bestimmten Verhältnis zueinander konsumiert. Wenn der Preis des Gutes s_1 also sinkt, dann würde entsprechend dem optimalen Verhältnis der beiden Güter mehr von beiden konsumiert (Varian, 2004, S. 97).

In der Realität ist Substituierbarkeit nicht vollkommen, sondern weist verschiedene Grade auf. Zum Beispiel sind Butter und Margarine sehr gut substituierbar, da sie sehr ähnliche Merkmale aufweisen (hoher Grad an Substituierbarkeit). Essiggurken und Butter sind hingegen nicht sehr gut substituierbar, man würde wohl lieber beide in einem gewissen Verhältnis zueinander konsumieren (niedriger Grad an Substituierbarkeit). Allerdings hängt der Grad der Substituierbarkeit von den betrachteten Präferenzstrukturen ab; es wäre durchaus vorstellbar, dass einem Haushalt Margarine nicht so gut schmeckt und diese gegen Butter substituieren würde (Binswanger, 2001, S. 125f).

Auf der Grundlage theoretischer Überlegungen ist es schwer, ein Gut zu finden, das einen hohen Grad an Substituierbarkeit mit Raumwärme aufweist. Daher kann erwartet werden, dass der Substitutionseffekt für Raumwärme eher gering ist. Umso wichtiger ist daher die Größe des Einkommenseffektes, da er den relativ größeren Effekt darstellt und für den Gesamteffekt die entscheidendere Rolle spielt (vgl. Binswanger, 2001, S. 125). Wie aber bereits im Abschnitt zum Einkommenseffekt auf Seite 8 beschrieben wurde, könnte dieser im Bereich Heizung sowohl positiv als auch negativ sein. Auf der Grundlage der Theorie ist es aus den oben genannten Gründen schwer, eine Hypothese über die Größe des Rebound-Effektes für Raumwärme zu erstellen.

Aus der Theorie kann zunächst festgehalten werden, dass der Gesamteffekt von Energieeffizienzsteigerungen auf den gesamten Energieverbrauch von der im konkreten Fall betrachteten Energiedienstleistung, der Größe und Richtung des Einkommenseffektes und der Substituierbarkeit mit anderen Gütern abhängt (Binswanger, 2001, S. 125). Wie in der Analyse des Gesamteffektes gezeigt wurde, kann der Haushalt mit gesteigerter Energieeffizienz in jedem Fall ein höheres Nutzenniveau realisieren.

Insgesamt kann die Veränderung des gesamten Energieverbrauchs auch deshalb schwer untersucht werden, da sie nicht nur von den Mengen der nachgefragten Güter, sondern auch von den Energieintensitäten der Dienstleistung (s_1) und der anderen Güter (s_2) abhängt (Berkhout et al., 2000, S. 428f). Empirisch ist es außerdem fast unmöglich, die Aufspaltung des Gesamteffektes

in Substitutions- und Einkommenseffekt zu schätzen (Greening et al., 2000, S. 390). Sie stellen daher eher ein theoretisches Konzept dar, um die Veränderung der Nachfrage zu verstehen. Um den Rebound-Effekt empirisch messen zu können, wird auf das Konzept der Elastizitäten zurückgegriffen. Diese werden im folgenden Abschnitt dargestellt und diskutiert.

2.2.2. Elastizitäten zur Berechnung des direkten Rebound-Effektes

Um den direkten Rebound-Effekt zu berechnen, braucht man ein Maß, das die Veränderung der Nachfrage nach Energie bzw. einer Energiedienstleistung misst, die auf eine Veränderung der Energieeffizienz dieser Dienstleistung zurückzuführen ist. Hierfür kann das ökonomische Konzept der Elastizität angewendet werden.

Energieeffizienzelnastizitäten der Nachfrage

Zunächst wird Energieeffizienz definiert als $\varepsilon = \frac{S}{E}$, wobei E die Menge an Energie darstellt, die benötigt wird, um eine Einheit Nutzarbeit S zu produzieren. Der direkte Rebound-Effekt wird mithilfe der Energieeffizienzelnastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit berechnet. Nutzarbeit kann mithilfe verschiedener thermodynamischer oder physikalischer Indikatoren annähernd berechnet werden (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 637). Für Heizung könnte ein solcher Indikator für Nutzarbeit beispielsweise die Stunden, in denen geheizt wird oder die durchschnittliche Raumtemperatur sein.

$$\eta_{\varepsilon}(S) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} \quad (2.1)$$

beschreibt die Energieeffizienzelnastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit (S). Sie beschreibt, um wie viel Prozent sich die Nachfrage nach Nutzarbeit verändert, wenn die Energieeffizienz einer Energiedienstleistung sich um 1% verändert.

Der Rückgang der Energienachfrage aufgrund einer Änderung der Energieeffizienz wird mithilfe der Effizienzelnastizität der Energienachfrage ausgedrückt

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E}. \quad (2.2)$$

Es wird also berechnet, um wie viel Prozent sich die Nachfrage nach Energie ändert, wenn sich die Energieeffizienz einer Dienstleistung um 1% verändert (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 638).

Aus der Definition der Energieeffizienz kann zwischen der Energieeffizienzelnastizität der Nachfrage nach Energie ($\eta_{\varepsilon}(E)$) und den beschriebenen Energieeffizienzelnastizitäten kann nach Sorrell und Dimitropoulos (2008) folgender Zusammenhang hergeleitet werden:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1 \quad (2.3)$$

Die Effizienzlastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit $\eta_\varepsilon(S)$ stellt den Rebound-Effekt und der Ausdruck minus 1 das technische Einsparpotential dar. Das technische Einsparpotential wird nur erreicht, wenn die Effizienzlastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit Null ist. Dann würde eine Effizienzsteigerung um 1%, auch einen tatsächlichen Rückgang der Energienachfrage um 1% bewirken (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 638). Ist die Nachfrage nach Nutzarbeit inelastisch ($0 < \eta_\varepsilon(S) < 1$), so wird zwar Energie eingespart, aber das technische Einsparpotential wird nicht in vollem Umfang realisiert. Wird beispielsweise $\eta_\varepsilon(S) = 0.2$ geschätzt, so ist $\eta_\varepsilon(E) = -0.8$. Vom technischen Einsparpotential wird nur 80% realisiert. Der Rebound beträgt 20%. Ist $\eta_\varepsilon(S)$ jedoch größer als eins, also die Nachfrage nach Nutzarbeit elastisch, so wird eine Effizienzsteigerung zu einer Erhöhung der Nachfrage nach Energie führen („Backfire“). Wird $\eta_\varepsilon(S)$ beispielsweise auf 1.10 geschätzt, so ist $\eta_\varepsilon(E) = 0.1$. Dies bedeutet, dass durch eine Effizienzsteigerung von 1% die Nachfrage nach Energie um 0.1% steigt. Wird die Effizienzlastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit auf eins geschätzt, so würde trotz der Effizienzsteigerung die genau gleiche Menge an Energie nachgefragt (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 638).

Diese Definition ist im Vergleich zu den folgenden Definitionen die akkurateste. Allerdings wird zur Schätzung anhand dieser Definition die passende Datengrundlage benötigt, um Nutzarbeit messen zu können. Je nach Datenlage und Untersuchungsgegenstand können auch die folgenden Definitionen als Annäherung an den Rebound-Effekt berechnet werden (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. 22).

Preiselastizitäten der Nachfrage

Der Rebound-Effekt kann neben der Energieeffizienzlastizität der Nachfrage auch mithilfe verschiedener Preiselastizitäten geschätzt werden. Dazu wird als Ausgangspunkt folgende Zusammenhang genommen:

$$p_S = \frac{p_E}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

Der Preis von Nutzarbeit ist das Verhältnis des Preises für Energie zur Energieeffizienz. Wenn also die Energieeffizienz steigt und der Preis für Energie gleich bleibt, dann sinkt der Preis für Nutzarbeit, *vice versa*. Wenn der Preis für Energie sinkt und die Energieeffizienz konstant bleibt, sinkt der Preis für Nutzarbeit auch und umgekehrt. Die Reaktion der Nachfrage des Haushaltes auf steigende oder sinkende Energiepreise wird also als symmetrisch angesehen (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 639).

Aus dieser Identität kann die Annäherung Energieeffizienzlastizität der Energienachfrage aus der Elastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit in Bezug auf die Kosten für Nutzarbeit $\eta_{p_S}(S)$ hergeleitet werden⁵:

$$\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{p_S}(S) - 1 \quad (2.5)$$

Hier stellt die negative Preiselastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit die Annäherung an den Rebound-Effekt dar. Ist Nutzarbeit ein normales Gut, dann gilt $\eta_{p_S}(S) \leq 0$. Wenn der Preis für

⁵Für eine ausführliche Herleitung dieses Zusammenhangs soll hier auf die ausführliche Darstellung von Sorrell und Dimitropoulos (2008, S. 646f) verwiesen werden.

Nutzarbeit also steigt, dann sinkt die Nachfrage und *vice versa* (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 639f).

Weitere Proxies des direkten Rebound-Effektes stellen die Elastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit in Bezug auf den Energiepreis $\eta_{p_E}(S)$ und die Preiselastizität der Nachfrage nach Energie in Bezug auf den Energiepreis $\eta_{p_E}(E)$ dar. Die Elastizität der Nachfrage nach Nutzarbeit in Bezug auf den Energiepreis wird hier alternativ mithilfe von $\eta_{p_E}(E)$ definiert:

$$\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{p_E}(S) - 1. \quad (2.6)$$

Hier wird die Elastizität der Nachfrage nach Heizung pro Stunde (S) für den Preis von Energie geschätzt. Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Approximation ist, dass der Energiepreis exogen sein muss. Ansonsten wäre die Veränderung der Kosten für Nutzarbeit nicht mehr proportional wie in Gleichung (2.4) angenommen. Diese Schätzmethode des Rebound-Effektes ist in der Praxis sehr einfach umzusetzen, da man nur Daten zum Energiepreis und die nachgefragte Menge nach der Energiedienstleistung benötigt, zum Beispiel den Preis für Kraftstoff und die gefahrenen Kilometer mit dem Auto, wobei diese die Nutzarbeit messen (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. 9f). Die Berechnung des direkten Rebound-Effekt kann auch mithilfe der Preiselastizität der Nachfrage nach Energie in Bezug auf den Energiepreis approximiert werden

$$\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{p_E}(E) - 1. \quad (2.7)$$

Dabei wird gemessen, um wie viel Prozent sich die Energienachfrage verändert, wenn sich die Energiepreis um 1% verändert. Dieser Ansatz ist aber nur sinnvoll, wenn sich der Energienachfrage nur auf eine Energiedienstleistung bezieht, da ansonsten der Effekt nicht direkt der Dienstleistung zugeschrieben werden kann (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 640).

Für die Schätzung des Rebound-Effektes mithilfe der Preiselastizität der Nachfrage nach Energie müssen zwei Annahmen erfüllt sein, damit die Ergebnisse valide sind: Erstens muss angenommen werden, dass der Haushalt auf eine Senkung des Preises genauso reagiert wie auf die Steigerung der Energieeffizienz. Zweitens darf die Energieeffizienzsteigerung nicht vom Preis für Energie beeinflusst werden, d.h. sie muss exogen sein (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. V). Außerdem gehen Elastizitäten vom Ein-Güter-Fall aus und lassen daher Möglichkeiten zur Substitution von Energie mit anderen Gütern unberücksichtigt (Binswanger, 2001, S. 123). Darüber hinaus muss die Nachfrage nach Nutzarbeit in Reaktion auf den Energiepreis nicht immer symmetrisch sein. Haas und Schipper (1998) finden, dass Energiepreiselastizitäten in Zeiten steigender Preise größer sind als in Zeiten fallender Preise. Wenn man also durchschnittliche Preiselastizitäten über Zeiträume mit steigenden und fallenden Preisen betrachtet könnte der Effekt verzerrt geschätzt werden (Haas und Schipper, 1998, S. 423).

2.2.3. Grenzen des Modells

Das Modell illustriert die Schwierigkeiten, generelle Aussagen über die Relevanz und Größe des Rebound-Effektes zu machen. Der Gesamteffekt von Energieeffizienz auf den Energieverbrauch hängt von den konkret betrachteten Dienstleistungen und den Annahmen über ihre gegenseitige Substituierbarkeit ab, genauso wie von der Richtung des Einkommenseffektes (Binswanger, 2001, S. 126).

Die Definition, dass die Nutzung von Energiedienstleistungen vom Verhältnis des Energiepreises zu seiner Effizienz (Gleichung 2.4) abhängt, wird kritisiert. Denn diese Annahme impliziert eine bestimmte strukturelle Form, die nicht belegt ist (Berkhout et al., 2000, S. 429). Außerdem wird die Annahme kritisiert, dass es keinen Sättigungspunkt oder physische Grenzen des Konsums und keine Zeitrestriktionen für den Haushalt gibt (Greening et al., 2000, S. 392). Ein weiterer Punkt ist, dass Preiselastizitäten asymmetrisch sein können, d.h. Reaktionen auf Preiserhöhungen können sich von Reaktionen auf Preissenkungen unterscheiden (Haas und Schipper, 1998, S. 423) und die Preiselastizitäten sich in der kurzen und langen Frist unterscheiden (Berkhout et al., 2000, S. 430). In diesem Fall wären die Schätzungen verzerrt. Die Annahme vollständiger Information kann außerdem verletzt sein, da der Haushalt den Energieverbrauch einzelner Dienstleistungen nur auf der Strom- bzw. Nebenkostenabrechnung einmal im Monat oder Jahr sehen kann und es dann oft schwer ist, einzelnen Dienstleistungen ihren jeweiligen Verbrauch zuzuordnen (Berkhout et al., 2000, S. 426). Es könnte daher auch sein, dass ein Haushalt Ersparnisse durch Energieeffizienz gar nicht so deutlich zuordnen kann, oder durch zusätzlich steigende Energiepreise nicht den Eindruck hat, eingespart zu haben. Daher könnte der Rebound-Effekt abgeschwächt werden.

Des Weiteren kann der Rebound-Effekt von der Analyseebene für die Schätzung des Rebound-Effektes abhängen, d.h. die Größe der Schätzer variiert, je nachdem ob die Haushalts-, Mikro- oder Makroebene untersucht wird (Birol und Keppler, 2000). Genauso spielt der zeitliche Rahmen (kurzfristig oder langfristig) eine Rolle und wie insbesondere im Abschnitt über die Elastizitäten (2.2.2) klar geworden ist, hängt der Effekt auch von theoretischen Annahmen ab (Schettkatt, 2011, S. 258).

Darüber hinaus können Effizienzgewinne Kosten verursachen, wie zum Beispiel die Investitionskosten in eine neue Technologie. Dies könnte dazu führen, dass der Rebound-Effekt geringer ausfällt, da sich die Investition aus Sicht des Haushaltes durch Einsparungen lohnen soll (Schettkatt, 2011, S. 255f). Dieser Zusammenhang hängt aber von der betreffenden Dienstleistung ab und kann sich über die Zeit verändern. Bei der Entwicklung von Computern gingen Energieeffizienzsteigerungen lange mit einer Senkung der Kapitalkosten einher (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 641). Die Kapitalkosten für eine neue Technologie sind aber in dem Moment, in dem die Technologie angeschafft wurde, versunkene Kosten. Die Investition kann kaum rückgängig gemacht werden, was auch besonders im Bereich Heizung der Fall ist. Eine Investition in eine neue Solaranlage oder einen neuen Boiler wird, ist sie einmal angeschafft, nicht mehr rückgängig gemacht. Daher kann angenommen werden, dass sie die Entscheidung des Haushaltes über die

Benutzung nicht weiter beeinflussen (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 642). Effizienz könnte darüber hinaus mehrere Inputfaktoren, also nicht nur Energie, beeinflussen. Dann wäre der Substitutionseffekt und mit ihm der Rebound vermutlich überschätzt (Schettkatt, 2011, S. 255f). Als weiteren Kritikpunkt kann angebracht werden, dass bei der Analyse im Zwei-Güter-Fall Zeitrestriktionen nicht berücksichtigt werden. Der Haushalt hat eigentlich zwei Funktionen, denn er konsumiert Energiedienstleistungen nicht nur, sondern produziert sie auch. So wird ein Mittagessen nicht nur konsumiert, sondern auch mit den Inputfaktoren Zeit, Energie und anderen Gütern produziert. Dies wird in Beckers Haushaltsmodell dargestellt, das Zeitkosten einbindet. Jeder Haushalt hat einen eigenen impliziten Preis für selbst bereit gestellte Dienstleistungen, die nicht nur vom Energiepreis abhängen, sondern auch von Kapitalkosten, Haushaltsarbeit und Lebensstil (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. 6). Der Faktor Zeit stellt also Opportunitätskosten dar, die hier nicht berücksichtigt wurden (Binswanger, 2001). Für den Bereich Raumwärme ist die Zeitrestriktion jedoch nicht von großer Relevanz (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. 19f). Energieeffizienz kann außerdem endogen sein. Wenn der Haushalt einen hohen Konsum von sich erwartet, könnte er voraussichtlich besonders effiziente Technologien wählen. Ein Haushalt könnte zum Beispiel ein besonders effizientes Diesel-Auto kaufen, weil zum Arbeiten eine lange Pendelstrecke zurückgelegt werden muss. In der Theorie würde der Effekt aber genau anders gewertet, nämlich, dass der Haushalt mehr fährt, weil er ein effizienteres Auto besitzt (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 644f). Diese Endogenität soll auch für die vorliegenden empirischen Ergebnisse in Abschnitt 3.2.3 überprüft werden.

2.3. Weitere Dimensionen des Rebound-Effektes

Bisher wurde nur der direkte Rebound-Effekt analysiert. In der Rebound-Forschung wird jedoch auf mehrere Dimensionen des Rebound-Effektes eingegangen, die hier im Überblick kurz vorgestellt werden sollen. Für die weitere Analyse werden sie jedoch nicht weitergehend betrachtet, da dies aus Platzgründen in dieser Arbeit nicht möglich sein wird. Daher soll sich im Prinzip auf die Typologie von Greening et al. (2000) konzentriert werden, die einen guten Überblick über die verschiedenen Effekte darstellt, und weitere Abgrenzungen noch kurz diskutiert werden.

Greening et al. (2000) identifizieren neben dem direkten Rebound-Effekt auch den sekundären Effekt, gesamtwirtschaftliche Effekte und den Transformationseffekt. Der sekundäre Effekt resultiert daraus, dass zusätzliches Einkommen auch zu einer erhöhten Nachfrage nach anderen Gütern und Dienstleistungen führen kann. Diese können wiederum aus Energiedienstleistungen bestehen und so die gesamte Energienachfrage wieder erhöhen. Hierzu kann noch einmal die Grafik 2.4 betrachtet werden, in der man feststellen kann, dass die Nachfrage nach Gut s_2 durch das veränderte Preisverhältnis gestiegen ist. Wie hoch der indirekte Effekt ausfällt, hängt davon ab, wie hoch der Anteil der Energiekosten für die effizientere Energiedienstleistung am gesamten Einkommen bzw. an den Gesamtausgaben für Energiedienstleistungen ist. Für private Haushalte sind nach Greening et al. (2000) sekundäre Effekte aber weniger relevant, da Energie einen relativ

geringen Anteil am Gesamteinkommen bzw. an den Gesamtausgaben ausmacht (Greening et al., 2000, S. 391). Dies könnte auch für Deutschland zutreffen. Im Jahr 2010 gaben deutsche Haushalte durchschnittlich 142 Euro monatlich für Energie im Bereich Wohnen aus, dies entspricht 6.5% der monatlichen Ausgaben (Statistisches Bundesamt, 2012b, S. 22).

Bei den gesamtwirtschaftlichen Effekten geht es um die Anpassung der Preise und Mengen in der Volkswirtschaft, die durch den veränderten effektiven Preis von Energieträgern hervorgerufen werden. Während der direkte und der sekundäre Effekt sich auf die Mikroebene beziehen und statische Effekte untersuchen, geht es auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene um dynamische Anpassungsprozesse in und zwischen verschiedenen Sektoren der ganzen Volkswirtschaft. Der Rebound wird als Gesamteffekt untersucht, bei dem die aggregierten Veränderungen in Konsum und Investition der gesamten Volkswirtschaft betrachtet werden. Auch die Anpassungen der Energieversorger an erhöhte Energieeffizienz werden hier berücksichtigt (Greening et al., 2000, S. 391).

Transformationseffekte beschreiben die Veränderungen der Präferenzen der Konsumenten und gesellschaftlicher Institutionen durch technologischen Fortschritt. Dieser Effekt umfasst außerdem Produktionsprozesse, die sich an gestiegene Energieeffizienz anpassen. Dies wird besonders klar, wenn man Energieeffizienz als technischen Fortschritt auffasst, also neue Technologien für die Produktion und neue Konsummöglichkeiten für Konsumenten. Allerdings wurde dieser Effekt aufgrund fehlender theoretischer Grundlagen und Daten bisher kaum erforscht (Greening et al., 2000, S. 391ff).

In der Literatur finden sich weitere Definitionen und Abgrenzungen für den Rebound-Effekt, die zum Teil nur in Nuancen bestehen, zum Teil aber auch sehr tiefgehend voneinander abweichen. Weitere Definitionen finden sich u.a. bei Berkhout et al. (2000) und Sorrell (2007). Binswanger (2001) beschreibt einen Rebound-Effekt für Zeit. Konsumenten können für eine bestimmte Dienstleistung zwischen verschiedenen Kombinationen aus Zeit und Energie wählen, z.B. ist ein Auto effizienter in Bezug auf Zeit, ein Fahrrad benötigt dagegen weniger Energie. Oft brauchen dabei zeiteffizientere Geräte mehr Energie. Da die Opportunitätskosten für Zeit, gemessen als reale Löhne, höher sind als die Energiekosten für eine Einheit einer Dienstleistung, bevorzugen viele Menschen Effizienz in Bezug auf Zeit anstatt Effizienz in Bezug auf Energie, was sich in höherem Energiekonsum niederschlagen kann (Binswanger, 2001, S. 127f; Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 644f). Für die Heizung in privaten Haushalten ist der Zeitfaktor aber vermutlich nicht so relevant, da kaum Zeit für das Heizen aufgewendet werden muss (Sorrell und Dimitropoulos, 2008, S. 644). Die unterschiedlichen Abgrenzungen des Rebound-Effekt führen dazu, dass in der empirische Forschung auch unterschiedliche Methodologien angewendet werden, die die Schätzungen über die Größe des Effektes schwer vergleichbar machen (Greening et al., 2000, S. 399).

3. Heizung in privaten Haushalten - Eine empirische Analyse

Im empirischen Teil der Arbeit werden drei Regressionen durchgeführt. Diese sollen dazu beitragen, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich eine erhöhte Energieeffizienz auf die Nachfrage nach Energie in privaten Haushalten im Bereich der Heizung auswirkt. Ziel wird es dabei sein, mit sozioökonomischen und technischen Daten zu erklären, wie lange ein Haushalt seine Wohnung täglich in der Heizperiode beheizt. Dabei nimmt insbesondere der Effekt von Modernisierungsmaßnahmen auf die Dauer der Beheizung eine zentrale Rolle ein. Des Weiteren wird untersucht, wie sich die Berücksichtigung von regionalen Witterungseinflüssen auf die Nachfrage und die Schätzer der bestehenden Regression auswirkt. Bevor auf die Daten und Modelle der empirischen Analyse eingegangen wird, soll an dieser Stelle die bestehende Literatur zum Rebound-Effekt im Bereich Raumwärme in privaten Haushalten kurz zusammengefasst werden, um einen Überblick über die bestehende empirische Forschung zu bekommen.

Auf der Grundlage von Energieeffizienzprojekten in Großbritannien untersuchen Milne und Boardman (2000), wie sich die Energieeffizienz auf die Innentemperatur einer Wohnung auswirkt. Ihre Analyse ergibt, dass der Rebound-Effekt von der Ausgangstemperatur vor der Modernisierungsmaßnahme abhängt. Je kälter die Durchschnittstemperatur einer Wohnung vor der Modernisierungsmaßnahme war, desto weniger wurden die Einsparpotentiale durch eine Erhöhung der Innentemperatur realisiert. Erst bei einer Innentemperatur von 19°C wurden circa 80% des technischen Einsparpotentials realisiert und bei einer Innentemperatur ab 20°C wird nach ihren Berechnungen die technisch mögliche Einsparung ganz erreicht. Die Autoren resümieren daher, dass, ausgehend vom Jahr 2000, Energieeffizienz bis etwa ins Jahr 2010 zunächst dazu führen wird, dass technische Energiesparpotentiale nicht realisiert werden, sondern in einer erhöhten Heiztemperatur resultieren. Erst wenn das Komfortniveau von 20°C Innentemperatur erreicht wird, werden technisch mögliche Einsparungen in vollem Umfang realisiert. Ein weiteres Ergebnis der Studie ist, dass unterschiedliche Effizienzmaßnahmen zu unterschiedlich hohen Rebound-Effekten führen. Maßnahmen, die die Strahlungswärme erhöhen, wie zum Beispiel Doppelverglasung, führen dazu, dass Bewohner sich auch bei einer geringeren Innentemperatur wohl fühlen. Daher können sie nach den Berechnungen der Autoren den Rebound-Effekt um bis zu 20% senken.

Schuler et al. (2000) finden in ihrer Studie für Deutschland heraus, dass bei der Erklärung der Nutzungsintensität Gebäudemerkmale eine signifikantere Rolle spielen als sozioökonomische Faktoren. Weiterhin ergeben ihre Zukunftsszenarien bis 2010, dass die durchschnittliche Größe der Wohnungen um 28% zunehmen wird und daher Energieeinsparungen davon „aufgefressen“ wer-

den. Um signifikante Energieeinsparungen zu realisieren, empfehlen die Autoren, die Einhaltung von bestehenden Gebäudestandards besser zu überwachen und die Renovierung des Gebäudebestands voranzutreiben.

Haas und Biermayr (2000) untersuchen in ihrer Studie den Rebound-Effekt für den Bereich Heizung in privaten Haushalten für Österreich. Dabei berechnen sie mit verschiedenen Methoden Rebound-Effekte zwischen 20 und 30%. Sie finden signifikante Unterschiede im Konsum von Energie, die auf verschiedene Heizsystemtypen und Gebäude zurückzuführen sind. Besonders beachtenswert ist das Ergebnis, dass die Energiekonsumkurve konkav ist und der Rebound-Effekt von den Parametern „Startpunkt der thermischen Qualität eines Gebäudes“ und „Ausmaß der Renovierung“ abhängt. Außerdem weisen die beiden Autoren auf die Irreversibilität von Effizienzverbesserungen in Zeiten fallender Preise hin. Wenn die Preise für Energie fallen, messen sie daher eine geringere Preiselastizität.

Madlener und Hauertmann (2011) schätzen mit Fixe-Effekte-Modellen den direkten Rebound-Effekt im Bereich Raumwärme für deutsche Haushalte. Dabei berechnen sie einen Effekt zwischen 12 % and 49%. Außerdem ergibt ihre Analyse, dass der Rebound-Effekt für Mieter höher ist als für Eigentümer. Das Einkommen hingegen spielt für Eigentümer eine andere Rolle als für Mieter. Unter Eigentümern steigt die Höhe des Rebound-Effektes mit höherem Haushaltseinkommen. Im Gegensatz dazu ist bei Mietern mit niedrigem Einkommen ein höherer Rebound-Effekt zu finden als bei Mietern mit hohem Einkommen.

3.1. Die Datengrundlage

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Die soziale Dimension des Rebound-Effektes“ (REBOUND) wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH, Mannheim und drei Kooperationspartnern eine Befragung zur ökonometrischen Quantifizierung des Rebound-Effektes durchgeführt, auf deren Grundlage auch die vorliegende empirische Analyse basiert. Die Befragung wurde im Rahmen des forsa.omninet-Panels durchgeführt. Forsa.omninet ist ein Panel, das für die Gesamtbevölkerung, d.h. alle in Privathaushalten Lebenden in Deutschland repräsentativ ist. Die Befragung fand vom 10. Mai bis 2. Juli 2012 statt.

Durch bereits bestehende Datensätze aus dem Panel konnten zusätzliche Daten hinzugefügt werden, die durch haushaltsbezogene Identifikationsnummern den entsprechenden Haushalten zugeordnet werden konnten. Auf diesem Weg wurden die Variablen für die Quadratmeterzahl der Wohnung (Fläche), der Typ des Hauses und die Postleitzahlzustellbezirke der Haushalte gewonnen.

Außentemperatur Winter

Neben den Daten aus der Befragung wurden auch Temperaturdaten und Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienstes genutzt (Deutscher Wetterdienst, 2012a). Die durchschnittliche Au-

ßentemperaturen für den Winter wurden als Durchschnittswerte für jedes Bundesland über die Monate Dezember 2011 bis Februar 2012 berechnet, da dies die Heizperiode direkt vor der Befragung darstellt. Anhand ihrer Postleitzahlen wurden die Haushalte den jeweiligen Bundesländern zugeordnet. Dabei gingen jedoch drei Beobachtungen verloren, weil deren Postleitzahlzustellbezirke nicht eindeutig einem Bundesland zugeordnet werden können.

Klimafaktoren

Klimafaktoren werden vom Deutschen Wetterdienst für Energieverbrauchsausweise berechnet und sind für alle Postleitzahlen frei auf der Website des Deutschen Wetterdienstes erhältlich (Deutscher Wetterdienst, 2012b). Klimafaktoren werden als Kennziffern über 12 Monate berechnet, bei denen die jährlichen Gradtage eines Postleitzahlzustellbezirks ins Verhältnis zum historischen Durchschnitt an Gradtagen in Würzburg berechnet werden (siehe Anhang B). Gradtage werden auch in anderen Studien wie von Haas und Biermayr (2000) und Madlener und Hauertmann (2011) verwendet, um Veränderungen im jährlichen Klima und regionaler Witterungsunterschiede aufzufangen.

Insgesamt werden in diesem Abschnitt drei Regressionen vorgestellt: In Regression 1 wird zunächst der Einfluss Verhaltensvariablen, technische und sozioökonomische Variablen darauf untersucht, wie lange Haushalte ihre Heizung in der Heizperiode abschalten. Regression 2 bezieht die Durchschnittstemperaturen auf Bundesländerebene und Regression 3 die Klimafaktoren auf Ebene der Postleitzahlen mit ein.

3.2. Die Regressionsmodelle

Im Folgenden wird eine Regressionsanalyse mit Querschnittsdaten durchgeführt. Dabei sollen die Stunden, in denen ein Haushalt in der Heizperiode die Heizung abgeschaltet hat, erklärt werden. Ziel dieser Regressionsanalyse ist es, Anhaltspunkte für den direkten Rebound-Effekt im Bereich Heizung zu finden, indem der Effekt einer Modernisierungsmaßnahme auf die Dauer der Beheizung gemessen wird. Außerdem sollen Faktoren, die die Nachfrage nach Heizung beeinflussen, identifiziert werden. Mit dieser Analyse wird der Rebound-Effekt für den Bereich Heizung aber nur für die Dauer der Beheizung berechnet, während Veränderungen in der Innentemperatur aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden. Eine weitere Einschränkung der Daten besteht darin, dass die Angabe über die Anzahl der Stunden, in denen die Heizung ausgeschaltet ist, auf der jeweiligen Selbsteinschätzung des befragten Haushaltsmitglieds basiert. Daher können diese Daten beispielsweise durch soziale Erwünschtheit verzerrt sein.

Die Modelle wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate (auch OLS nach der englischen Bezeichnung ‘Ordinary Least Squares’) berechnet. Die Methode findet in der Ökonometrie weit verbreitet Anwendung. Sie dient dazu, lineare Zusammenhänge zwischen der zu erklärenden und den erklärenden Variablen zu berechnen. Um die bestmögliche Schätzung zu erhalten, werden dazu die Abweichungen der tatsächlich beobachteten Werte zu den geschätzten Werten minimiert.

Mit dieser Methode erhält man erwartungstreue und konsistente Schätzer. Wenn außerdem die Annahmen der klassischen Regressionsanalyse erfüllt sind, sind die Schätzer BLUE (engl. best linear unbiased estimator, dt. bester linearer unverzerrter Schätzer). Damit sind die Schätzer linear, unverzerrt und konsistent, sowie effizient. Linear meint dabei, dass der Schätzer eine Linearkombination aus erklärender und zu erklärender Variablen ist. Unverzerrt heißt, dass die OLS-Schätzungen der Koeffizienten durchschnittlich um den wahren Wert des Schätzers in der Grundgesamtheit streuen und diesen treffen. Konsistent bedeutet, dass der Schätzer eines Koeffizienten sich mit zunehmendem Stichprobenumfang immer weiter an den tatsächlichen Wert der Grundgesamtheit annähert (Auer und Rottmann, 2011, S. 420ff und 458f). Auf die Frage, ob die Annahmen der klassischen Regressionanalyse in den vorliegenden Modellen erfüllt sind, wird im Abschnitt 3.2.3 eingegangen, um zu überprüfen, wie gut die Schätzungen sind.

3.2.1. Beschreibung der Variablen

Stunden ohne Heizung: Die zu erklärende Variable Stunden ohne Heizung enthält die Anzahl der Stunden, in denen nach Angaben des befragten Haushalts, die Heizung an einem normalen Wochentag während der Heizperiode abgeschaltet wird. Die Variable kann daher Ausprägungen zwischen 0 und 24 haben. Im vorliegenden Sample wird die Heizung täglich durchschnittlich für 9.7 Stunden abgestellt⁶ (3.1).

Modernisierung Heizung: Dieser Dummy nimmt den Wert 1 an, wenn für die jeweilige Wohnung mindestens eine Modernisierungsmaßnahme im Bereich Heizung seit 2005 durchgeführt wurde. Der Bereich Heizung umfasst dabei den Wechsel des Energieträgers im Heiz- oder Warmwassersystem, eine Modernisierung des Boilers oder des Heizkessels, eine Installation einer Solarwärmanlage für Warmwasser oder Heizung und die Installation einer Wärmepumpe für Warmwasser oder Heizung.

Modernisierung Wärmedämmung: Wurde für die jeweilige Wohnung im Bereich Wärmedämmung mindestens eine Modernisierungsmaßnahme seit 2005 durchgeführt, so nimmt dieser Dummy den Wert 1 an. Wärmedämmung umfasst Maßnahmen zur Dämmung des Dachs bzw. der obersten Geschossdecke, der Außenwände und der Kellerdecke sowie die Installation eines automatischen Belüftungssystems.

Modernisierung Fenster/Türen: Dieser Dummy ist gleich 1, wenn in der entsprechende Wohnung Fenster bzw. Türen seit 2005 erneuert wurden. Bezogen auf die genannten Modernisierungsvariablen bildet also die Gruppe der Haushalte, für deren Wohnungen sonstige oder keine Modernisierungsmaßnahmen seit dem Jahr 2005 durchgeführt wurde, die Referenzgruppe.

Abschalten der Heizung: Wenn das befragte Haushaltsmitglied angibt, dass die Heizung normalerweise heruntergedreht wird, wenn niemand mehr zu Hause ist, oder diese durch ein automatisches System heruntergefahren wird, ist dieser Dummy gleich 1.

⁶Die Befragten wurden konkret gefragt: „Die folgende Frage bezieht sich ausschließlich auf die Heizperiode, also die kalte Jahreszeit. Was würden Sie sagen, wie viele Stunden im Durchschnitt wird in Ihrem Haushalt an einem normalen Wochentag, also einem Tag von Montag bis Freitag, die Heizung heruntergefahren oder abgestellt? Bitte denken Sie dabei auch an die Nachtstunden.“

Freistehendes Haus: Dieser Dummy nimmt den Wert 1 an, wenn es sich bei dem beobachteten Wohngebäude um ein freistehendes Ein- oder Zweifamilienhaus handelt. Die Referenzgruppe bilden entsprechend die Haushalte mit Wohnungen in allen anderen Gebäudetypen (z.B. Reihenhäuser, Mehrfamilienhäuser und Hochhäuser).

Baujahr vor 1978: Dieser Dummy ist 1, wenn sich die Wohnung in einem vor 1978 erbauten Gebäude befindet. Referenz sind demnach Haushalte mit Wohnungen in Gebäuden, die 1978 oder danach erbaut wurden.

Haushaltsgröße: Diese Variable erfasst die Anzahl der Personen, die in einem Haushalt leben. Sie liegt im Sample zwischen 1 und 11.

Einkommen \geq 2500Euro: Der Dummy Einkommen \geq 2500Euro ist 1, wenn der Haushalt über ein monatliches Nettoeinkommen von mindestens 2500 Euro verfügt. Diese Gruppe enthält 43% der Befragten.

Einkommen_miss: Dieser Dummy enthält alle Haushalte, die ihr Einkommen nicht angegeben haben, sie stellen rund 18% der Befragten dar. Die Referenzgruppe zu den beiden Einkommens-Dummies sind alle, die unter 2500 Euro monatlich zur Verfügung haben, was auf rund 40% der Befragten zutrifft.

Tabelle 3.1.: Kurzbeschreibung der Variablen

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standardfehler	Min.	Max.
Stunden ohne Heizung	5033	9.748	4.825	0	24
Modernisierung Heizung	5735	0.287	0.452	0	1
Modern. Wärmedämmung	5735	0.232	0.422	0	1
Modern. Fenster/Türen	5735	0.232	0.422	0	1
Abschalten der Heizung	5670	0.697	0.460	0	1
Freistehendes Haus	3239	0.408	0.491	0	1
Baujahr vor 1978	3112	0.577	0.494	0	1
Wohnfläche	3337	107.692	47.548	11	300
Haushaltsgröße	6178	2.358	1.151	1	11
Einkommen \geq 2500	6197	0.429	0.495	0	1
Einkommen_miss	6197	0.177	0.381	0	1
Erwerbslosigkeit	5844	0.268	0.443	0	1
Alter	6197	49.436	14.705	18	89
Höhere Bildung	5979	0.466	0.499	0	1
Außentemperatur Winter	3237	1.379	1.044	-0.45	2.84
Klimafaktor	3242	1.171	0.098	0.84	1.41

Alter: Diese Variable beschreibt das Alter des befragten Haushaltsmitglieds in Jahren. Es liegt im Sample zwischen 18 und 89 Jahren.

Höhere Bildung: Bildung ist hier Dummy für diejenigen mit höherer Bildung. Dies umfasst das allgemeine oder fachgebundene Abitur bzw. Hochschulreife, die Fachhochschulreife oder den Ab-

schluss eines Fach-/Hochschulstudium. Referenz sind alle anderen Abschlüsse und auch solche ohne Abschluss.

Erwerbslosigkeit: Dieser Dummy ist 1, wenn das befragte Haushaltsmitglied nicht erwerbstätig ist. Referenz sind alle anderen möglichen Angaben.

Außentemperatur Winter: Diese Variable beinhaltet die durchschnittliche Außentemperatur über die Monate Dezember 2011 bis Februar 2012 in Grad Celsius für jedes deutsche Bundesland. Dieser Zeitraum entspricht dem meteorologischen Winter vor der Befragung.

Klimafaktor: Der Klimafaktor setzt die Gradtage eines Postleitzahlbezirks ins Verhältnis mit dem langjährigen historischen Mittel der Gradtage in Würzburg. Je höher die Kennziffer ist, desto weniger Gradtage gab es und desto wärmer ist ein Bezirk. Die Kennziffer wird für ein ganzes Jahr berechnet und bezieht sich hier auf den Zeitraum vom 01.04.2011 bis 31.03.2012. Eine genauere Beschreibung befindet sich in Anhang B.

In Tabelle 3.1 werden die Variablen mit Durchschnittswert und Standardfehler sowie minimaler und maximaler Ausprägung beschrieben, um die Variablen der Datengrundlage kurz deskriptiv zusammenzufassen.

3.2.2. Ergebnisse der Schätzung

Mithilfe der folgenden Regressionsanalyse soll ökonometrisch untersucht werden, welche Faktoren das Heizverhalten – und zwar konkret die Dauer, die eine Heizung in der kalten Jahreszeit durchschnittlich abgedreht wird – beeinflussen. In Bezug auf einen möglichen Rebound-Effekt wird dabei besonderes Augenmerk auf den Einfluss von im Wärmebereich durchgeführten Modernisierungsmaßnahmen gelegt. Ziel ist es, den Einfluss solcher Energieeffizienz steigernder Maßnahmen zu quantifizieren und unter Berücksichtigung zahlreicher relevanter Kontrollvariablen auf statistische Signifikanz zu überprüfen.

In Tabelle 3.2 sind insgesamt drei Regressionsmodelle aufgeführt. Dabei stellt Regression 1 das Grundmodell ohne Wetterdaten dar. In Modell 2 wurde dann die Variable berücksichtigt, die die Außentemperatur der Bundesländer für die Monate Dezember 2011 bis Februar 2012 enthält. In Regression 3 wurde zur Überprüfung der Ergebnisse von Regression 2 anstatt der Außentemperatur auf Bundesländerebene der Klimafaktor nach Postleitzahlbezirken eingefügt.

Regression 1: Gebäudetechnische und sozioökonomische Faktoren

Maßnahmendummies:

Nach der Theorie des Rebounds müssten Haushalte mit einer Maßnahme im Bereich Heizung eine Verringerung des effektiven Preises für Heizung erreicht haben und daher mehr Stunden am Tag heizen. Dies wird in der Regression bestätigt, da solche Haushalte *ceteris paribus* durchschnittlich 39 Minuten pro Tag länger heizen⁷. Der Effekt ist auf dem 1%- Signifikanzniveau signifikant.

⁷Da die abhängige Variable in Stunden gemessen wird, wurde der Koeffizient zum besseren Verständnis in Minuten umgerechnet. Dazu wird der Koeffizient -0.649 mit 60 Minuten (also einer Stunde) multipliziert.

Tabelle 3.2.: Modellschätzungen mit der Methode der Kleinsten Quadrate

Unabhängige Variable:	(1)	(2)	(3)
Stunden ohne Heizung pro Tag			
Modernisierung Heizung	-0.649*** (0.191)	-0.629*** (0.190)	-0.662*** (0.191)
Modernisierung Wärmedämmung	0.175 (0.217)	0.150 (0.218)	0.172 (0.218)
Modernisierung Fenster/Türen	0.0770 (0.213)	0.105 (0.213)	0.095 (0.213)
Abschalten der Heizung	3.246*** (0.187)	3.274*** (0.187)	3.287*** (0.188)
Freistehendes Haus	-0.561*** (0.179)	-0.539*** (0.179)	-0.461** (0.181)
Baujahr vor 1978	-0.143 (0.192)	-0.196 (0.192)	-0.199 (0.193)
Haushaltsgröße	-0.261*** (0.091)	-0.239*** (0.092)	-0.238*** (0.092)
Einkommen \geq 2500	-0.484** (0.208)	-0.477** (0.208)	-0.504** (0.208)
Einkommen_miss	-0.712** (0.300)	-0.706** (0.300)	-0.710** (0.300)
Alter	-0.030*** (0.009)	-0.029*** (0.009)	-0.030*** (0.009)
Höhere Bildung	0.395** (0.185)	0.409** (0.185)	0.376** (0.185)
Erwerbslosigkeit	-0.267 (0.234)	-0.266 (0.234)	-0.269 (0.234)
Außentemperatur Winter		0.265*** (0.084)	
Klimafaktor			2.910*** (0.927)
Konstante	10.20*** (0.602)	9.764*** (0.610)	6.714*** (1.253)
N	2263	2260	2263
R^2	0.149	0.153	0.153
angep. R^2	0.145	0.148	0.148

Robuste Standardfehler in Klammern

* $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

Dies kann als Bestätigung für den Mechanismus des Rebound-Effektes gesehen werden, da die Einführung dieser Technologien mit einer erhöhten Nachfrage nach Heizung einhergeht.

Eine Modernisierungsmaßnahme im Bereich Wärmedämmung könnte ebenfalls dazu führen, dass der Haushalt mehr Heizung nachfragt. In der Regression wird jedoch nicht bestätigt, dass Wärmedämmung die Dauer der Beheizung signifikant erhöht. Eine Erneuerung der Fenster und Türen führt ebenfalls nicht signifikant dazu, dass der Haushalt die Beheizung seiner Wohnung verlängert. Dass die Größe des Rebound-Effektes auch von der Art der Modernisierungsmaßnahme abhängt, bestätigt das Ergebnis von Milne und Boardman (2000). Maßnahmen, die die Strahlungswärme erhöhen, reduzieren den Rebound-Effekt und erhöhen das tatsächliche Einsparpotential (Milne und Boardman, 2000, S. 413). In jedem Fall scheinen sich unterschiedliche Maßnahmen verschieden auf die Nachfrage nach Heizenergie auszuwirken.

Wenn die befragten Haushaltsmitglieder angeben, dass die Heizung beim Verlassen des Hauses abgedreht wird, kann erwartet werden, dass die Zahl der Stunden, in denen die Heizung abgeschaltet wird, höher ist, als bei Haushalten, in denen nicht abgeschaltet wird. Dies wird empirisch bestätigt, da Haushalte, die die Heizung abdrehen, *c.p.* im Durchschnitt 3 Stunden und 15 Minuten am Tag weniger heizen und dieser Effekt hoch signifikant ist.

Technische Merkmale des Gebäudes:

Für freistehende Häuser ist im Vergleich zu anderen Wohnungen (wie z.B. in Mehrfamilienhäusern, Wohnblock) zu erwarten, dass mehr geheizt wird. Familienhäuser haben mehr Außenfläche, die Wärme abgeben kann und daher höhere Verluste an die Umgebung, die von dem Verhältnis zwischen Außenfläche und Größe der Wohnfläche abhängen (Schuler et al., 2000, S. 879). Außerdem könnte die eigene Wohnung durch eine größere Außenfläche im Vergleich mit beispielsweise Mehrfamilienhäusern durch fehlende angrenzende Wohnungen schneller auskühlen. Dies wird durch die Regression bestätigt. Wenn der Haushalt in einem freistehenden Haus mit ein bis zwei Wohnungen lebt, heizt er *c.p.* in der Heizperiode durchschnittlich 34 Minuten täglich länger. Auch hier ist der Effekt auf allen üblichen Signifikanzniveaus signifikant.

In einem älteren Haus kann erwartet werden, dass es schlechter gedämmt ist, und daher einen größeren Heizbedarf hat. Dies wird aber in der Regression nicht bestätigt, da der Koeffizient vergleichsweise klein und nicht signifikant ist. Trotzdem hat der Koeffizient das erwartete negative Vorzeichen, d.h. in Häusern, die vor 1978 gebaut wurde, wird tendentiell länger geheizt. Auch Madlener und Hauertmann (2011, S. 17f) finden im Einklang mit diesen Ergebnissen keinen signifikanten Effekt des Baujahrs auf die Energienachfrage für Heizung.

Sozioökonomische Faktoren des Haushalts:

Es ist zu erwarten, dass mit steigender Haushaltsgröße die Zahl der Stunden sinkt, an denen die Heizung abgeschaltet ist. Wenn mehr Personen eine Wohnung nutzen, könnte die Zahl der Stunden, in denen mindestens eine Person in der Wohnung ist, steigen. Dies wird auch empirisch mit Signifikanz auf allen üblichen Signifikanzniveaus bestätigt: Mit jedem zusätzlichen Haushaltsmitglied sinkt *c.p.* im Durchschnitt die Zeit ohne Heizung um 25 Minuten pro Tag.

Milne und Boardman (2000) finden in ihrer Studie zum Heizen in Haushalten in Großbritannien heraus, dass der Rebound-Effekt in niedrigen Einkommensgruppen größer ist. In der vorliegenden Regression wird aber mit einem Nettoeinkommen über 2500 Euro täglich rund 30 Minuten länger geheizt, bzw. kürzer abgedreht. Dieser Effekt ist auch auf dem 1% Signifikanzniveau signifikant. Da das Einkommen bei Einkommen_miss unbekannt ist, kann hier keine Aussage über den Einfluss des Einkommens in dieser Gruppe getroffen werden.

Mit steigendem Alter könnte der Heizbedarf steigen und damit die Zahl der Stunden, in denen geheizt wird, sinken. Empirisch konnte ein geringer, aber hoch signifikanter Effekt festgestellt werden. Mit steigendem Alter nehmen die Stunden ohne Heizung ab. Problematisch ist hier auch, dass Alter ein individuelles Merkmal ist und daher zu erwarten ist, dass dies für die Beschreibung des Haushaltsverbrauchs nicht präzise genug ist.

Bildung könnte einen positiven Effekt auf ausgeschaltete Stunden erwarten lassen, wenn man annimmt, dass mit steigender Bildung auch das Umweltbewusstsein/die Notwendigkeit zum Energiesparen gesteigert wird. In der Regression schalten Menschen mit höherer Bildung *c.p.* im Durchschnitt ca. 20 Minuten länger die Heizung aus. Dieses Ergebnis ist auf 5%- Signifikanzniveau signifikant.

Wenn sich im Haushalt ein erwerbsloses Mitglied befindet, könnte dadurch mehr geheizt werden, da mehr Zeit zu Hause verbracht wird. Ist der Befragte erwerbslos, so ist im Haushalt die Heizung *c.p.* durchschnittlich 16 Minuten länger angeschaltet. Der Effekt ist nicht signifikant, daher gibt es keine statistische Absicherung, dass sich in einem Haushalt, in dem das befragte Mitglied erwerbslos ist, tatsächlich länger geheizt wird.

Die Konstante beträgt rund 10 Stunden. Sie ist allerdings schwierig zu interpretieren, da sie den Wert der Stunden ohne Heizung angibt, wenn alle unabhängigen Variablen den Wert 0 annehmen. Dies ist in dieser Regression jedoch aufgrund der Variablen Alter und Haushaltsgröße, die sinnvollerweise niemals den Wert 0 annehmen, nicht möglich.

Insgesamt konnten in der Regression die erwarteten Effekte der einzelnen Variablen bestätigt werden. Mit der hohen Zahl an Beobachtungen ($n= 2263$) können die Ergebnisse als aussagekräftig gewertet werden. Die Dummies für die Modernisierungsmaßnahmen verdienen Aufmerksamkeit: Wird im Bereich Heizung investiert, so kann eine signifikante Steigerung der Heizdauer festgestellt werden. Dies trifft aber nicht auf die Maßnahmen Wärmedämmung und Erneuerung der Fenster und Türen zu. Eine mögliche Erklärung wäre, dass diese Maßnahmen die Strahlungswärme erhöhen und so die als komfortabel empfundene Temperatur sinkt (Milne und Boardman, 2000, S. 413). Auch sozioökonomische Faktoren können Unterschiede im Heizverhalten erklären. Allerdings ist bei den Faktoren Alter, Höhere Bildung und Erwerbslosigkeit problematisch, dass sie nur für das befragte Haushaltsmitglied zutreffen und daher nur beschränkte Aussagekraft für das Heizverhalten des gesamten Haushaltes haben. Das angepasste R^2 von 0.145 zeigt, dass 14.5% der Varianz der Variable Stunden von dem Modell erklärt werden.

Bisher wurde das Klima in der Region des Haushaltes noch nicht berücksichtigt, das aber vermutlich eine wichtige Rolle dabei spielt, die Unterschiede im Heizbedarf zu erklären. Dies wird in den beiden folgenden Regressionen untersucht. Im Hinblick auf den Rebound-Effekt ist außerdem

interessant, ob sich der Schätzer für die Modernisierungsmaßnahmen durch die Berücksichtigung des Klimas verändern.

Regression 2: Außentemperatur im Winter

In diesem Modell wurde die Variable Außentemperatur in das Modell eingefügt, um den Einfluss der durchschnittlichen Außentemperatur im Winter auf die Dauer der Beheizung zu messen. Die Absicht dahinter ist, zu überprüfen, ob es einen kausalen Zusammenhang zwischen den Variablen Modernisierungsmaßnahme in Heizung und der täglichen Heizdauer gibt. Wenn der Schätzer der Modernisierung im Bereich Heizung sich stark durch die Berücksichtigung von Temperaturunterschieden verändert, kann vermutet werden, dass ein Zusammenhang bzw. eine Korrelation zwischen den beiden Variablen besteht. Daraufhin könnte dann untersucht werden, ob nicht die Modernisierungsmaßnahme im Bereich Heizung zu einer höheren Nachfrage, sondern der besonders hohe Verbrauch durch eine niedrigere Außentemperatur zu einer Investition in Modernisierungsmaßnahmen führt. Dann würden nämlich Haushalte, die einen besonders hohen Heizenergieverbrauch antizipieren (beispielsweise weil sie in einer kälteren Gegend wohnen), in effizientere Technologien im Bereich Heizung investieren. Längeres Heizen im Haushalt wäre nicht durch die Modernisierungsmaßnahme im Bereich Heizung bedingt, sondern vielmehr die Modernisierungsmaßnahme durch längeres Heizen.

In der Regression sollte die durchschnittliche Außentemperatur im Bundesland eines Haushalts einen positiven Effekt auf die Stunden haben, an denen die Heizung abgeschaltet ist. Umso wärmer das Bundesland, desto länger bleibt die Heizung im Winter ausgeschaltet. Dieser Effekt kann auch in der Regression gemessen werden. In einem Bundesland, indem es über den Winter ein Grad Celsius wärmer war als in einem anderen, wird die Heizung *c.p.* durchschnittlich 15 Minuten länger abgeschaltet. Hier ist allerdings zu beachten, dass die Außentemperatur auf Bundesländerebene relativ ungenau ist, da besonders in flächenmäßig großen Bundesländern, wie z.B. Baden-Württemberg regionale Temperaturunterschiede nicht berücksichtigt werden. Der Schätzer der Außentemperatur ist hoch signifikant und trägt zur Erklärungskraft des Modells bei.

Der geschätzte Koeffizient von Heizung verändert sich durch die Berücksichtigung der Außentemperatur nicht signifikant und erweist sich als robust. Die anderen Schätzer bleiben auch in etwa gleich groß. Dies lässt darauf schließen, dass auch unter Berücksichtigung von Temperaturunterschieden und damit eines natürlich höheren Bedarfs an Heizung der Effekt von Modernisierungen im Bereich Heizung bestehen bleibt. Dies ist ein Beleg für die Hypothese, dass Heizungsmaßnahmen dazu führen, dass mehr geheizt wird und damit für den Rebound-Effekt.

Regression 3: Klimafaktor

In der letzten Regression wurde die durchschnittliche Außentemperatur im Winter auf Ebene der Bundesländer durch Klimafaktoren ersetzt. Da Klimafaktoren für alle Postleitzahlbezirke zur Verfügung stehen, können sie regionale Temperaturunterschiede genauer als die Variable Außentemperatur im Winter abbilden. Auch der Schätzer für den Klimafaktor hat das erwartete, positive Vorzeichen. Umso wärmer der Postleitzahlbezirk eines Haushalt ist, desto mehr Stunden

bleibt die Heizung ausgeschaltet. Allerdings ist es schwierig die Höhe des Schätzers zu interpretieren, da es sich bei den Klimafaktoren um die Anteile der Gradtage am historischen Mittel handelt, die in Würzburg gemessen werden. Trotz ihrer relativen Ungenauigkeit kann der Effekt der Variablen Außentemperatur in ihrem Vorzeichen, in ihrer Signifikanz und Wirkung auf das Modell bestätigt werden.

Auch durch die Berücksichtigung des Klimafaktors wird der Schätzer von Heizung nicht signifikant beeinflusst. Insgesamt bleiben auch die Schätzer der restlichen erklärenden Variablen in etwa gleich groß und behalten Vorzeichen und Signifikanz. Daher kann bestätigt werden, dass die Witterung zur Erklärung der Nachfrage nach Heizung beiträgt. Die Schätzer des Modell 1 und 2 können also als robust angesehen werden.

3.2.3. Die Güte der geschätzten Modelle

Um beurteilen zu können, wie „gut“ das Modell die zugrunde liegende Gesamtheit beschreibt, sollen nun die Annahmen des Klassischen Regressionsmodells diskutiert werden. Für die Methode der kleinsten Quadrate müssen diese sechs Annahmen erfüllt sein, um die „bestmöglichen“ Schätzer für die Koeffizienten und Standardfehler zu erhalten (Gauss-Markov-Theorem). Die Überprüfung ist wichtig, um aus der Regression valide Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit, die ja anhand einer Stichprobe geschätzt wird, zu ziehen.

Die erste Annahme besagt, dass die Parameter linear sein müssen, um von OLS geschätzt zu werden. Das heißt, die Koeffizienten in der Grundgesamtheit müssen parameterlinear sein oder durch eine mathematische Transformation in eine lineare Form gebracht werden. Außerdem streuen die Störterme (also die Abweichungen der Beobachtungen vom Erwartungswert) ε_i um ihren bedingten Erwartungswert. Für einen gegebenen Wert der erklärenden Variable X liegen verschiedene Beobachtungen mit unterschiedlichen Werten für die erklärende Variable Y vor. Dann müssen die Abweichungen ε_i in den verschiedenen Beobachtungen um ihren bedingten Erwartungswert zufällig streuen. Das heißt, es dürfen keine systematischen Messfehler in den Abweichungen (Störterm) vorliegen. Der Erwartungswert liegt auf der geschätzten Regressionsgeraden. Daraus folgt, dass die Störterme nicht mit der erklärenden Variable X korreliert sein dürfen. Die dritte Annahme besagt, dass die Varianz der Störterme ε_i nicht vom Wert der erklärenden Variable X abhängen darf. Die Abweichungen der einzelnen Störterme dürfen beispielsweise nicht mit einem steigenden X zunehmen (Homoskedastizität). Viertens dürfen Störterme nicht miteinander korreliert sein (Autokorrelation). Des Weiteren muss die Anzahl der Parameter immer kleiner sein als die Anzahl der Beobachtungen, um eine Schätzung durchführen zu können. Die letzte Annahme besagt, dass keine vollkommene oder unvollkommene Multikollinearität zwischen erklärenden Variablen im Modell vorliegen darf. Dies wäre der Fall, wenn man eine erklärende Variable mithilfe einer anderen erklärenden Variablen in einer linearen Funktion darstellen kann (Auer und Rottmann, 2011, S. 437ff).

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wird es zwar nicht möglich sein, die Modelle erschöpfend auf diese Annahmen zu untersuchen, aber anhand einiger Maße kann die Güte der geschätzten Modelle überprüft werden. Im Abschnitt Modellspezifikation wird die zweite Annahme, in Ab-

schnitt Heteroskedastizität die vierte Annahme und in Abschnitt Multikollinearität die sechste Annahme für die durchgeführten Regressionen überprüft. Autokorrelation ist bei der gegebenen Datengrundlage nicht zu erwarten, da sie häufig bei Zeitreihenanalysen auftritt und die vorliegenden Daten Querschnittsdaten sind (Auer und Rottmann, 2011, S. 536). Auch die fünfte Annahme ist aufgrund der hohen Zahl an Beobachtungen erfüllt. Zuletzt wird im Abschnitt Endogenität mithilfe von Korrelationskoeffizienten überprüft, ob der Dummy für die Modernisierungsmaßnahmen exogen oder endogen im Modell ist.

Die Modellspezifikation

Die korrekte Modellspezifikation der Regression ist besonders wichtig für eine Schätzung, d.h. die Variablen und die funktionale Form der Regression muss korrekt gewählt werden. Die hier vorgestellte Regression soll in diesem Abschnitt auf potentiell vernachlässigte Variablen untersucht werden. Fehlen nämlich im Modell Variablen, die für die Erklärung der zu erklärenden Variable Y (also den Stunden ohne Heizung) wichtig sind, können die Effekte, die den Schätzern im Modell zugeschrieben werden verzerrt sein. Wenn zwei erklärende Variablen X_1 und X_2 in irgendeiner Weise korreliert sind, aber nur X_1 wurde ins Modell aufgenommen, so wird in der Schätzung der Effekt von X_2 X_1 zugeschrieben und die geschätzten Koeffizienten sind nicht mehr BLUE. Allerdings muss eine weggelassene Variable nicht zwangsläufig zu einer Verzerrung führen, wenn sie nicht mit einer im Modell befindlichen Variable korreliert ist. Liegt aber tatsächlich eine Korrelation zwischen einer vernachlässigten und einer vorhandenen Variable vor, so wird der Standardfehler der OLS-Schätzer verzerrt geschätzt und damit die Berechnung der t -Statistik verzerrt. Anzeichen von vernachlässigten Variablen sind insbesondere, wenn Vorzeichen eines geschätzten Regressionsparameters signifikant anders geschätzt werden als in der Modelltheorie zu erwarten ist. Daher ist es wichtig, die Variablen aufgrund theoretischer Überlegungen in das Modell aufzunehmen und zu überprüfen, ob die theoretischen Erwartungen an die Effekte einzelner Variablen durch das Modell bestätigt werden (Auer und Rottmann, 2011, S. 477ff).

In Abschnitt 3.2.1 wurde dies bereits beschrieben und die Vorzeichen stimmen weitgehend mit den theoretischen Überlegungen überein. Das angepasste R^2 zeigt, dass nur ein geringer Teil der Varianz in Y durch das Modell erklärt wird. Daher ist es wahrscheinlich, dass Variablen fehlen, um die vom Modell bisher nicht erklärte Varianz zu erklären. Aufgrund der verfügbaren Daten gibt aber keine Anzeichen dafür, dass die bestehenden Koeffizienten durch weggelassene Variablen verzerrt sind, da sie durch die Hinzunahme anderer Variablen, die im Laufe der Untersuchung zum Modell hinzugefügt wurden, nicht signifikant verändert wurden.

Heteroskedastizität

Heteroskedastizität liegt dann vor, wenn Varianzen für verschiedene Werte von X nicht konstant sind, also beispielsweise mit zunehmendem X auch die Abweichungen der Y von der geschätzten Regressionsgeraden zunehmen. Dies ist besonders bei Querschnittsdaten der Fall. Im Gegensatz dazu bedeutet Homoskedastizität, dass die Varianzen in Y immer gleich sind, egal welchen Wert

X annimmt. Beispielsweise sind Haushalte mit geringem Einkommen weniger flexibel bei der Ausgabenverteilung für Konsum (Y) als Haushalte mit hohem Einkommen. Dadurch können innerhalb einer höheren Einkommensgruppe die Ausgaben stark vom durchschnittlichen Konsum dieser Gruppe abweichen, während es in der unteren Einkommensgruppe nur wenig Varianz gibt (Auer und Rottmann, 2011, S. 518 ff). Die vorliegenden Daten sind auch Querschnittsdaten und daher ist es sinnvoll, auf Heterogenität zu untersuchen.

Aus der Heteroskedastizität ergibt sich zwar keine Verzerrung der OLS-Schätzer, aber die Schätzer ihrer Standardfehler sind nicht mehr effizient und konsistent. Sie werden in der Regel unterschätzt, da die Schätzer der Standardfehler in der OLS-Methode auf der Annahme der Homoskedastizität aufbauen und in der Praxis große Varianzen häufig bei großen X-Werten zu finden sind. Die Gefahr liegt darin, dass dadurch die Signifikanz der Regressionskoeffizienten überschätzt wird (Auer und Rottmann, 2011, S. 518ff).

Mit der Schätzung von robusten Standardfehlern (White-Standardfehlern) wurden konsistente Schätzer der Varianz geschätzt. Dadurch werden die Standardfehler und damit die t- und p-Werte konsistent geschätzt, aber weder das R^2 noch die geschätzten Koeffizienten verändert. Die Signifikanz einzelner Regressionskoeffizienten ist auch im Falle vorliegender Heterogenität abgesichert. Des Weiteren sind die meisten Variablen der Regression Dummies und daher nicht anfällig für Heteroskedastizität. Heteroskedastizität ist bei den Variablen Einkommen, Alter und Haushaltsgröße zu erwarten. Effiziente Schätzer können bei Heteroskedastizität allerdings nur durch Schätzungen mit der WLS (gewichtetes Prinzip der kleinsten Quadrate) berechnet werden, auf die in dieser Arbeit aus Platzgründen nicht weiter eingegangen werden kann (Auer und Rottmann, 2011, S. 518ff).

Multikollinearität

Multikollinearität liegt dann vor, wenn zwei erklärende Variablen dasselbe messen. Eine Variable kann in diesem Fall als Linearkombination einer anderen erklärenden Variable ausgedrückt werden. Auch wenn keine exakte lineare Beziehung zwischen zwei oder mehr Variablen besteht, kann die OLS-Schätzung die Variablen und ihre Effekte nicht mehr unterscheiden. Effekte einer Variablen werden möglicherweise einer anderen Variable zugeordnet. Multikollinearität kann laut Auer und Rottmann (2011) bestehen, wenn das R^2 hoch ist, aber wenige Variablen im Modell signifikant sind. Außerdem können die Korrelationskoeffizienten der erklärenden Variablen paarweise überprüft werden, wobei auf diese Weise Multikollinearität nicht zwischen mehr als zwei Variablen nicht überprüft werden kann. Zuletzt können noch Hilfsregressionen und sogenannte Varianzschwellungsfaktoren zur Untersuchung auf Multikollinearität angewendet werden (Auer und Rottmann, 2011, S. 452 und 505ff). Darauf soll in dieser Arbeit allerdings nicht weiter eingegangen werden.

Zunächst kann in der Regressionstabelle (Tab 3.2) abgelesen werden, dass das Modell einige signifikante Variablen beinhaltet und das R^2 nicht sehr hoch ist. Hier gibt es keinen Hinweis auf Multikollinearität.

In der Korrelationstabelle (Tab. 3.3) werden noch einmal die Korrelationskoeffizienten einiger

Tabelle 3.3.: Korrelationskoeffizienten

	Mod. Heizung	Fläche	Freist. Haus	Winter	Klimafaktor	HH-Größe
Mod. Heizung	1.0000					
Fläche	0.1098	1.0000				
Freist. Haus	0.0937	0.4728	1.0000			
Winter	-0.0210	-0.0732	-0.0801	1.0000		
Klimafaktor	0.0068	-0.1196	-0.2012	0.5370	1.0000	
HH-Größe	0.0136	0.4339	0.2036	-0.0786	-0.1181	1.0000

Variablen zusammengestellt, die bei der Untersuchung der vollständigen Korrelationstabelle auffällig waren. Der Korrelationskoeffizient misst den linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen und die Richtung dieses Zusammenhangs. Der Korrelationskoeffizient r_{yx} ist definiert für $-1 \leq r_{yx} \leq 1$. Sind zwei Variablen stark korreliert, dann ist der Betrag von r_{yx} nahe 1 (Auer und Rottmann, 2011, S. 433f). Die Quadratmeterzahl der Wohnung wurde nicht mit in die Regressionen aufgenommen, da sie mit der Variable Freistehendes Haus relativ stark korreliert ist, genauso wie mit der Variable Haushaltsgröße. Um Multikollinearität auszuschließen, wurde diese Variable deshalb nicht in das Modell aufgenommen. Abschließend gibt es aber keine Hinweise für bestehende Multikollinearität im Modell.

Exogenität der Variable Heizung

Bisher wurde in der Analyse immer davon ausgegangen, dass die Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen exogen gegeben ist. Das heißt, dass ein Haushalt im Bereich Heizung investiert und daraufhin seine Nachfrage nach Energie/Nutzarbeit steigert, da sie billiger wird. Es ist aber auch möglich, dass ein Haushalt einen besonders hohen Bedarf an Heizung antizipiert und daraufhin in Modernisierungsmaßnahmen investiert. Dann wäre die Variable Heizung nicht unabhängig, sondern von den Stunden, in denen geheizt wird, beeinflusst (Sorrell und Dimitropoulos, 2007, S. VI).

Ein höherer Konsum von Heizenergie könnte dadurch verursacht werden, dass der Haushalt in einer kälteren Gegend wohnt und daher mehr heizen muss, um eine bestimmte Innentemperatur zu erreichen. Dabei wäre der höhere Bedarf kein Resultat der Modernisierungsmaßnahme, sondern die Modernisierungsmaßnahme Resultat eines höheren Bedarfs. Auch besonders freistehende Häuser können zu einem überdurchschnittlich hohen Bedarf an Heizung führen, der nicht durch die Modernisierungsmaßnahme verursacht ist. Dies liegt daran, dass freistehende Häuser schneller auskühlen, da sie eine größere Außenfläche haben und daher höhere Verluste an die Umgebung mit sich bringen, die von dem Verhältnis zwischen Außenfläche und Größe der Wohnfläche abhängen (Schuler et al., 2000, S. 879). Außerdem wird das Auskühlen der eigenen Wohnung durch angrenzende Wohnungen, wie zum Beispiel in Mehrfamilienhäusern, nicht verhindert. Bei besonders großer Quadratmeterzahl müsste auch durchschnittlich mehr und länger

geheizt werden, um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen. Dies ist besonders wichtig, da es nicht nur schwer ist, den Rebound-Effekt zu messen, sondern auch zugrunde liegende Kausalitäten genauer zu untersuchen (Van den Bergh, 2011, S. 52).

Um Exogenität zu überprüfen, wurde außerdem in den Regressionen 2 und 3 die Effekte der Witterungsvariablen Winter und Klimafaktor und ihr Zusammenhang mit der Variable Heizung untersucht. Die Variablen sind nicht mit der Variable Heizung korreliert (vgl. Tab. 3.3). Dies spricht auch dafür, dass die *ceteris paribus* längere Beheizung der Wohnung in Haushalten, die eine Modernisierungsmaßnahme im Bereich Heizung durchgeführt haben, nicht an einem besonders hohen Bedarf an Heizenergie durch kaltes Klima liegt. Vielmehr ist das längere Beheizen der Wohnung mit einer Modernisierungsmaßnahme im Bereich Heizung tatsächlich auf die Modernisierungsmaßnahme zurückzuführen. Auch für die Variablen Freistehendes Haus und Fläche der Wohnung ist keine Korrelation mit der Variable Heizung festzustellen. Abschließend kann also festgestellt werden, dass der Schätzer für die Modernisierung im Bereich Heizung tatsächlich eine höhere Nachfrage nach Heizung durch eine Modernisierungsmaßnahme misst. Die neue und effizientere Bereitstellung der Dienstleistung Heizung führt zu einer durchschnittlich längeren Dauer der Beheizung.

3.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse

Am Anfang der empirischen Analyse stand die Frage, welchen Einfluss verschiedene technische und sozioökonomische Variablen auf die Dauer der Beheizung haben und ob ein Zusammenhang zwischen der Investition im Bereich Heizung und der Dauer der Beheizung besteht. Für die kontrollierten sozioökonomischen und technischen Variablen im Modell konnten die theoretischen und aus bestehenden empirischen Arbeiten erwarteten Effekte in der Regression weitgehend bestätigt werden. Zudem kann mit einiger Sicherheit gesagt werden, dass tatsächlich ein Zusammenhang zwischen der Investition in eine Modernisierung im Bereich Raumwärme und einer längeren Dauer der Beheizung besteht. Wenn ein Haushalt im Bereich Heizung investiert hat, so heizt er *ceteris paribus*, im Durchschnitt etwa 40 Minuten länger. Das technische Einsparpotential wird durch Verhaltensänderungen nicht in vollem Umfang realisiert. Der konkrete Umfang des Rebound-Effektes konnte hier allerdings nicht bestimmt werden. Für die anderen Modernisierungskategorien Wärmedämmung und Erneuerung der Fenster bzw. Türen konnte kein signifikanter Effekt auf die Stundenzahl ohne Beheizung beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass diese Maßnahmen die Strahlungswärme erhöhen und so die als komfortabel empfundene Temperatur sinkt (Milne und Boardman, 2000, S. 413). Dadurch könnte tendentiell nicht mehr so lange geheizt werden. Zu einer genaueren Überprüfung dieser Hypothese wäre es aber wichtig, Daten zur Innentemperatur der Wohnung und deren Veränderung nach einer Maßnahme zu analysieren, die hier aber nicht zur Verfügung stehen.

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Modernisierungsmaßnahme im Bereich Heizung und einer längeren Beheizung der Wohnung konnte die Hypothese verworfen werden, dass die Modernisierung durch einen höheren Bedarf an Heizung erklärt bzw. verursacht wird.

Diese Erkenntnis basiert darauf, dass keine Korrelation zwischen der Variablen Modernisierung der Heizung und den Variablen Quadratmeterzahl, freistehendes Haus, Außentemperatur Winter und dem Klimafaktor gefunden werden konnte. Außerdem erweist sich der Schätzer der Modernisierungsmaßnahme Heizung unter Berücksichtigung der Klimavariablen als robust.

Die Überprüfung der Annahmen des klassischen Regressionsmodell ergab, dass das Modell ein relativ geringes R^2 aufweist, das wahrscheinlich auf vernachlässigte Variablen zurückzuführen ist. Allerdings gibt es keine Hinweise darauf, dass diese vernachlässigten Variablen die Schätzer, die sich im Modell befinden, verzerren. Um Multikollinearität zu vermeiden, wurde auch die Variable Quadratmeterzahl bereits aus dem Modell ausgeschlossen. Weiterhin ist es unwahrscheinlich, dass die Signifikanz der Regressionskoeffizienten überschätzt wird und einzelne Schätzer einer Verzerrung unterliegen.

Nichtsdestotrotz sind die Ergebnisse nur unter Berücksichtigung einiger ernst zu nehmender Beschränkungen hinsichtlich der Daten zu bewerten. Zum einen basieren die Ausprägungen der Variablen auf der Selbsteinschätzung der befragten Haushaltsmitglieder. Dadurch ist es möglich, dass es zu Verzerrungen aufgrund sozialer Erwünschtheit kommt. In der Praxis ist es aus technischen und praktischen Gründen allerdings nur unter großem Aufwand möglich, Daten für den Bereich Raumwärme in großem Umfang direkt im Haushalt zu erheben. Des Weiteren muss aufgrund der Datenlage von der starken Annahme ausgegangen werden, dass eine Modernisierung auch immer eine Effizienzsteigerung darstellt bzw. dass neuere Produkte generell effizienter sind als ältere. Zusätzlich konnte die konkrete Effizienzsteigerung einzelner Maßnahmen nicht gemessen werden und daher sind in einem Dummy Maßnahmen mit verschieden hoher Effizienzsteigerung enthalten. Auch der direkte Vergleich zwischen den Maßnahmendummies kann aus diesem Grund schwierig sein.

Trotz dieser Einschränkungen leisten die empirischen Ergebnisse einen Beitrag zum Verständnis des Rebound-Effektes. Sie bestätigen existierende wissenschaftliche Ergebnisse über die Effekte einzelner Variablen auf den Energieverbrauch im Bereich Raumwärme und geben einen Hinweis auf weitere Forschungsmöglichkeiten im Bereich Raumwärme, die auf der Untersuchung verschiedener Maßnahmen und deren Wirkung aufbauen könnte.

4. Energieeffizienz in der Klimapolitik - Eine Bilanz

Im Zentrum der vorliegenden Analyse stand die Frage, ob Energieeffizienz aus ökonomischer Perspektive tatsächlich zu einer Reduktion des Energieverbrauchs führt und so diese Ziele erreicht werden können. Dies wurde mit Fokus auf den Bereich Heizung in privaten Haushalten untersucht. Die Erkenntnisse auf empirischer und theoretischer Ebene sollen im Folgenden noch einmal kurz zusammengefasst werden. Außerdem sollen sie in die bestehende Literatur zum Bereich Raumwärme eingeordnet werden. Abschließend werden die Konsequenzen aus den Ergebnissen der Rebound-Forschung für den Einsatz von Energieeffizienz als politisches Instrument zur Reduzierung von CO₂-Emissionen diskutiert.

Im theoretischen Teil der Abschlussarbeit wurden die Auswirkungen gesteigerter Energieeffizienz auf die Nachfrage eines Haushaltes nach einer Energiedienstleistung untersucht. Unter der Voraussetzung, dass die Energiedienstleistung kein Giffen-Gut ist, kann davon ausgegangen werden, dass Einsparpotentiale aufgrund gesteigerter Energieeffizienz nicht in vollem Umfang realisiert werden. Das Einsparpotential meint dabei die mögliche Einsparung von Energie, die erreicht werden würde, wenn der Haushalt nach der Effizienzsteigerung einer Dienstleistung genau dieselbe Menge dieser Energiedienstleistung nachfragt. Die zentrale Frage ist daher, ob die gestiegene Energieeffizienz dazu führt, dass nur ein Teil des Einsparpotentials realisiert wird, der direkte Rebound-Effekt, oder ob der gesunkene effektive Preis zu einer Erhöhung der Gesamtnachfrage nach der Energiedienstleistung führt („backfire“). Im Fall des Rebound-Effektes ist außerdem interessant, wie groß die tatsächlich realisierte Einsparung ist. Der Rebound-Effekt ist aber sehr komplex, da dieser von der im konkreten Fall betrachteten Energiedienstleistung, deren Energieintensität, der Größe und Richtung des Einkommenseffektes und der Substitutierbarkeit mit anderen Gütern abhängt (Binswanger, 2001, S. 125; Berkhout et al., 2000, S. 428f). Um den Rebound-Effekt messen zu können, wird in der Praxis daher auf das Konzept der Elastizitäten zurückgegriffen.

In der empirischen Analyse wurden Hinweise auf einen Rebound-Effekt im Bereich Raumwärme gefunden. Modernisierungsmaßnahmen im Bereich Heizung führen dazu, dass die durchschnittliche Stundenzahl, in denen die Wohnung nicht beheizt wird, sinkt. Der konkrete Rebound-Effekt konnte jedoch aufgrund fehlender Daten, insbesondere zur Heizintensität, nicht quantifiziert werden. Der zweite wichtige Hinweis der empirischen Analyse ist, dass die Art der Modernisierungsmaßnahme für den Bereich Raumwärme eine Rolle spielt. Eine mögliche Erklärung hierfür folgt der Argumentation von Milne und Boardman (2000, S. 413), dass Maßnahmen, die die Strah-

lungswärme erhöhen, zu einem geringeren Rebound-Effekt führen, da dadurch möglicherweise die als komfortabel empfundene Innentemperatur gesenkt wird.

Madlener und Hauertmann (2011, S. 19f) kommen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass der direkte Rebound-Effekt für Raumwärme in privaten Haushalten existiert und eine signifikante Größe hat. Die Ergebnisse der vorliegenden Analyse deuten auch in diese Richtung. Auch die anderen beobachteten Variablen, deren Effekte auf die Dauer der Beheizung in der Regressionsanalyse kontrolliert wurden, entsprechen weitgehend den beobachteten Effekten in den bereits beschriebenen Studien von Madlener und Hauertmann (2011), Schuler et al. (2000), Milne und Boardman (2000) und Haas und Biermayr (2000). Unter dem Vorbehalt unterschiedlicher konzeptioneller Methoden finden Madlener und Hauertmann (2011, S. 3f) in ihrem Literaturüberblick, dass der Rebound-Effekt für den Bereich Raumwärme zwischen 21% und 43% liegt. In ihrer eigenen Studie zum direkten Rebound-Effekt in deutschen Haushalten schätzen die Autoren einen Rebound-Effekt zwischen 12% und 49%. Zusammenfassend kann der Rebound-Effekt für Raumwärme in privaten Haushalten daher als signifikant bezeichnet werden. Diese Ergebnisse zeigen auch, dass mit großer Wahrscheinlichkeit mindestens die Hälfte der potentiellen Einsparungen durch Energieeffizienz realisiert werden. Dazu passen auch die Daten des Statistisches Bundesamt (2012a), dass Haushalte immer weniger Energie verbrauchen (vgl. S. 1). Zudem wurde bisher kein Hinweis auf „backfire“ im Bereich Heizung gefunden.

Was aber sind nun die Konsequenzen aus diesen Ergebnissen zum Rebound-Effekt? Welche Rolle sollte Energieeffizienz in der Klimapolitik spielen? Stellt sie ein passendes Instrument zur Verringerung des Energieverbrauchs dar? Hierüber herrscht in der Literatur Uneinigkeit und rege Diskussion.

Die Problematik dieser Diskussion besteht in der Komplexität des Themas, die in der Definitionen des Rebound-Effektes, der Betrachtung partieller Ausschnitte und praktischen Hindernissen bei der Messung von Energie bzw. Energieintensität liegt. Neben der Betrachtung einzelner Energiedienstleistungen, werden auch verschiedene Analyseebenen (Mikro- und Makroebene, vgl. 2.3) betrachtet, die ein Gesamtbild über den Rebound-Effekt erschweren. Einige Autoren weisen auf eine Kombination verschiedener Instrumente hin, die notwendig sei, um CO₂-Einsparungen zu realisieren. Dazu gehören v.a. Preisinstrumente wie beispielsweise eine Energiesteuer (Sorrell, 2007, S. VIII). Greening et al. (2000, S. 398f) halten den Rebound-Effekt für nicht signifikant genug, um Energieeffizienz als Option für die Reduktion von CO₂-Emissionen auszuschließen. Vielmehr müsste Energieeffizienz durch marktbasierende Instrumente ergänzt werden. Dies wird auch von Van den Bergh (2011, S. 53) diskutiert, der einen Mix aus Politikinstrumenten vorschlägt, wie beispielsweise ein Emissionshandelssystem, das eine Obergrenze für diese Emissionen vorgibt. Auch Gillingham et al. (2013, S. 476) gehen von einem geringen Rebound-Effekt aus, den sie auf 5-30% beziffern und der auf makroökonomischer Ebene maximal 60% erreicht. Die Autoren sehen daher keine Gefahr für „backfire“ und kommen zu dem Schluss, dass trotz Rebound-Effekt noch genug Energie durch Energieeffizienz gespart wird, um sie als Politikoption zu erwägen.

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben beschäftigt sich Binswanger (2001) mit dem Rebound Effekt in Bezug auf Zeit. Er betont, dass Energienutzung sehr stark beeinflusst wird durch Inno-

vationen zeitsparender Natur. Umso höher die Opportunitätskosten der Zeit in Form des Lohnes und umso geringer die Energiepreise sind, desto mehr erhöhen diese Innovationen tendentiell den gesamten Energieverbrauch. Daher schlägt dieser Autor eine ökologische Steuerreform vor, die den Energiepreis relativ zum Lohn anhebt, um so eine Reduktion des Energiekonsums im Haushaltssektor zu bewirken (Binswanger, 2001, S. 131).

Brookes (2000, S. 355) schreibt, dass es den „free lunch“, der bereits in der Einleitung (S. 1) beschrieben wurde, eben nicht gibt, sondern jede Maßnahme zur Beschränkung einer Ressource unweigerlich zu einer Beschränkung der Konsum- oder Produktionsmöglichkeiten führt. Weiterhin kritisiert er besonders, dass bei der Effizienzmaximierung unter allen verfügbaren Ressourcen nur Energie berücksichtigt wird. Dies führe unweigerlich zu einer Verzerrung der gesamten Ressourcenallokation und damit zu wirtschaftlichem Schaden. Der Autor betont, dass es wünschenswert sei, Kohlendioxid aus den Emissionen zu entfernen, um die Erderwärmung zu stoppen. Dazu solle der Konsum von kohlendioxidhaltigen Energieträgern gesenkt werden, was jedoch nicht dasselbe sei wie die Steigerung von Energieeffizienz. Daher kommt der Autor zu dem Schluss, dass das Verbot, die Rationierung oder Besteuerung von kohlendioxidhaltigen Energieträgern sinnvolle Instrumente für dieses Ziel seien (Brookes, 2000, S. 357).

In eine ähnliche Richtung geht die Argumentation von Mennel und Sturm (2008). Sie schreiben, dass Energieeffizienz kein sinnvolles Mittel zum Klimaschutz sei, sondern Ergebnis einer erfolgreichen Internalisierung von gesellschaftlichem Grenzscha-den, der durch CO₂-Emissionen verursacht wird. Staatliche Regulierung solle daher direkt bei Schadstoffemissionen ansetzen und nicht pauschal beim Energieverbrauch. So könnten CO₂-Emissionen bepreist werden, um den negativen Grenzscha-den zu internalisieren. Dadurch würden fossile Brennstoffe teurer und die Energieeffizienz würde im Ergebnis sinken (Mennel und Sturm, 2008, S. 20f).

Welche Konsequenzen die Rebound-Forschung für den Einsatz von Energieeffizienz als Politikinstrument hat, wird unter den oben beschriebenen Autoren diskutiert. Es ist allerdings schwer, dies zu beurteilen. Zumindest sollte der Rebound-Effekt bei der Evaluation von Politikinstrumenten zur Reduktion von CO₂-Emissionen berücksichtigt werden. Aus ökonomischer Sicht sollte bei der Bewertung von Instrumenten immer das Kriterium der Kosteneffizienz berücksichtigt werden, sodass ein gegebenes umweltpolitisches Ziel mit so geringen Kosten für die Gesellschaft wie möglich erreicht wird (Mennel und Sturm, 2008, S. 5). Diese Arbeit hat gezeigt, dass der Rebound-Effekt ein komplexes Thema ist. Dennoch kann aufgrund der theoretischen und empirischen Analyse, die in dieser Arbeit dargestellt wurde, gezeigt werden, dass ein Rebound-Effekt im Bereich Raumwärme zu erwarten ist. Auch die bisherige Forschung im Bereich Raumwärme zeigt, dass der Rebound-Effekt tatsächlich zu finden, allerdings kein „backfire“ zu erwarten ist. Über die Ergebnisse dieser Abschlussarbeit hinaus, könnte weitere Forschung den indirekten Rebound-Effekt und gesamtwirtschaftliche Effekte untersuchen, um so ein ganzheitlicheres Bild der Effekte von Energieeffizienz im Bereich Raumwärme zu ermöglichen.

A. Herleitung der Slutsky-Zerlegung

In diesem Anhang soll die Slutsky Zerlegung formal dargestellt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, kann mithilfe der Slutsky-Identität die Veränderung der Nachfrage aufgrund einer Preisänderung in zwei Effekte zerlegt werden: in den Substitutions- und den Einkommenseffekt. Diese Identität kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\Delta s_1 = \Delta s_1^s + \Delta s_1^e. \quad (\text{A.1})$$

Dabei stellt Δs_1^s die Veränderung der Nachfrage von Gut s_1 aufgrund des Substitutionseffektes und Δs_1^e die Veränderung der Nachfrage aufgrund des Einkommenseffektes dar. Addiert ergeben diese beiden Effekte die Gesamtveränderung der Nachfrage Δs_1 nach Gut s_1 (Varian, 2010, S. 143).

Für die Berechnung des Slutsky-Substitutionseffektes wird zunächst von der Marshallschen Nachfragefunktion nach dem betreffenden Gut ausgegangen. Die Nachfragefunktion wird berechnet, indem die Nutzenfunktion unter Berücksichtigung der Budgetrestriktion maximiert wird. Diese Nutzenfunktion $u(s_1, s_2)$ hängt von den beiden Dienstleistungen s_1 und s_2 ab. Die Budgetrestriktion wird dargestellt durch $m = p_1 s_1 + p_2 s_2$, wobei p_1 den Preis für Gut s_1 und p_2 den Preis für Gut s_2 bezeichnet und m das fixe Haushaltsbudget ist, das vollständig auf die beiden Güter aufgeteilt wird. Die Marshallsche Nachfragefunktion kann als Funktion von den Preisen und dem Haushaltsbudget ausgedrückt werden $s_1(p_1, p_2, m)$ (Varian, 2010, S. 82f). Im Optimum vor der Preissteigerung konsumiert der Haushalt die optimalen Mengen s_1^* und s_2^* , mit dem Budget m_1 und den Preisen p_1 und p_2 .

Nun sinkt der Preis des Gutes s_1 aufgrund einer Effizienzsteigerung von p_1 auf p'_1 . Der Substitutionseffekt der Slutsky-Zerlegung wird nun berechnet, indem das Einkommen zunächst so angepasst wird, dass das Einkommen dem Haushalt gerade noch genügt, um sich den Ausgangskonsumpunkt A mit den Mengen s_1^* und s_2^* leisten zu können. Die Slutsky-Nachfragefunktion für Gut s_1 kann als Funktion von s_1^* und s_2^* , die konstant gehalten werden sollen, und den Preisen p_1 und p_2 geschrieben werden. Sie kann somit in der Form $s_1^s(p_1, p_2, s_1^*, s_2^*)$ ausgedrückt werden. Sinkt der Preis p_1 auf p'_1 , so wird der Substitutionseffekt berechnet, indem die Nachfrageänderung für die Preise p'_1 und p_2 und den gegebenen Mengen s_1^* und s_2^* und dem Budget $m' = p'_1 s_1^* + p_2 s_2^*$ berechnet wird:

$$s_1^s(p'_1, p_2, s_1^*, s_2^*) \equiv s_1(p'_1, p_2, p'_1 s_1^* + p_2 s_2^*). \quad (\text{A.2})$$

Diese Definition kann so interpretiert werden, dass die Slutsky- Nachfrage von Gut s_1 die Menge

ist, die der Haushalt zu den neuen Preisen und einem Budget, berechnet mit dem neuen Preis und dem Konsumbündel des Ausgangskonsumpunktes A, kaufen kann (Varian, 2010, S. 157). Nun wird diese Identität A.2 nach dem Preis p_1 abgeleitet

$$\frac{\partial s_1^s(p_1, p_2, s_1^*, s_2^*)}{\partial p_1} = \frac{\partial s_1(p'_1, p_2, m_1)}{\partial p_1} + \frac{\partial s_1(p'_1, p_2, m_1)}{\partial m} s_1^*. \quad (\text{A.3})$$

Da das Budget m eine Funktion des Preises p_1 ist, findet im rechten Ausdruck die Kettenregel Anwendung: Zunächst wird die äußere Funktion nach m abgeleitet und dann die Budgetrestriktion noch einmal nach p_1 . Die innere Ableitung, also die Ableitung des Budgets m nach p_1 entspricht s_1^* . Dies wird noch umgestellt, sodass die Gesamtveränderung des Preiseffektes auf der linken Seite steht und dieser dem Substitutionseffekt minus dem Einkommenseffekt entspricht

$$\frac{\partial s_1(p'_1, p_2, m_1)}{\partial p_1} = \frac{\partial s_1^s(p_1, p_2, s_1^*, s_2^*)}{\partial p_1} - \frac{\partial s_1(p'_1, p_2, m_1)}{\partial m} s_1^*. \quad (\text{A.4})$$

Dies entspricht genau der oben beschriebenen Slutsky-Identität (A.1). Der Substitutionseffekt wird durch den ersten Ausdruck auf der rechten Seite der Gleichung ausgedrückt. Er kann interpretiert werden als die Veränderung der Nachfrage, wenn der Preis sich verändert, aber das Einkommen so angeglichen wird, dass das Ausgangskonsumbündel gerade noch erreichbar ist. Das Vorzeichen des Substitutionseffektes ist immer ein negatives Vorzeichen⁸, d.h. der Substitutionseffekt verläuft immer in die entgegengesetzte Richtung der Preisveränderung. Daher es gilt

$$\frac{\partial s_1^s(p_1, p_2, s_1^*, s_2^*)}{\partial p_1} \leq 0. \quad (\text{A.5})$$

Das Vorzeichen des Einkommenseffektes hängt, wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, davon ab, ob das betroffene Gut inferior oder normal ist (Varian, 2010, S. 143f und S. 157f). Ist das Gut ein normales Gut, so gilt

$$\frac{\partial s_1(p_1, p_2, m_1)}{\partial m} > 0, \quad (\text{A.6})$$

d.h. wenn aufgrund der Preissenkung die Kaufkraft bzw. das reale verfügbare Einkommen steigt, steigt auch die Nachfrage nach dem Gut s_1 . Für ein inferiores Gut gilt

$$\frac{\partial s_1(p_1, p_2, m_1)}{\partial m} \leq 0. \quad (\text{A.7})$$

Wenn das Einkommen steigt, sinkt die Nachfrage. Bei einem inferioren Gut kann daher der Gesamteffekt negativ, positiv oder Null sein. Dies hängt von der relativen Größe der absoluten Werte des Substitutions- und Einkommenseffektes ab (Gravelle und Rees, 2004, S. 55f).

⁸Dies wird in (Varian, 2010, S. 142) gezeigt.

B. Definition des Klimafaktors

Klimafaktoren werden vom Deutschen Wetterdienst für Energieverbrauchsausweise berechnet und sind für alle Postleitzahlen frei auf der Website des Deutschen Wetterdienstes erhältlich (Deutscher Wetterdienst, 2012b). Diese Klimafaktoren werden für die Erstellung von Energieverbrauchsausweisen zur Witterungsbereinigung des Energieverbrauchs von Gebäuden verwendet. Umso größer der Klimafaktor, desto wärmer der Zustellbezirk. Klimafaktoren werden als Kennziffern mithilfe von Gradtagen über 12 Monate berechnet. Gradtage stellen alle Tage dar, in denen die den Tagesmittelwerte der Lufttemperatur unter 15°C sinkt. An solchen Tagen wird die Differenz zwischen 20°C und dem tatsächlichen Mittelwert gebildet. Diese Differenzen werden über ein ganzes Jahr aufsummiert, um die Jahresgradtage zu erhalten (VDI- Richtlinie 3807 Deutscher Wetterdienst (2012b)).

Der Klimafaktor wird folgendermaßen berechnet

$$KF = \frac{G_m}{G} \quad (\text{B.1})$$

wobei G_m das vieljährliche Mittel der Jahresgradtage der Station in Würzburg darstellt und G die Jahresgradtage des aktuellen Jahres für den entsprechenden Postleitzahlzustellbezirk. Die jährlichen Gradtage eines Postleitzahlzustellbezirks werden also ins Verhältnis zum historischen Durchschnitt an Gradtagen in Würzburg gesetzt. Wenn in einem Zustellbezirk die Jahresgradtage steigen, so sinkt der gesamte Faktor. Dadurch kann diese Maßzahl so interpretiert werden, dass der Klimafaktor umso größer ist, je weniger Jahresgradtage und damit Heiztage es in einem Postleitzahlzustellbezirk gibt (Deutscher Wetterdienst, 2012b).

Literaturverzeichnis

- AUER, B. UND H. ROTTMANN (2011), Statistik und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler. Eine anwendungsorientierte Einführung., 2. Aufl., Gabler, Wiesbaden.
- BERKHOUT, P.H.G., J. MUSKENS, UND J.W. VELTHUIJSEN (2000), Defining the Rebound Effect, *Energy Policy* 28(6-7), 425-432.
- BINSWANGER, M. (2001), Technological Progress and Sustainable Development: What about the Rebound Effect?, *Ecological Economics* 36(1), 119-132.
- BIROL, F. UND J. H. KEPPLER (2000), Prices, Technology Development and the Rebound Effect, *Energy Policy* 28(6-7), 457-469.
- BROOKES, L. G. (1978), Energy Policy, the Energy Price Fallacy and the Role of Nuclear Energy in the UK, *Energy Policy* 6(2), 94-106.
- BROOKES, L. G. (2000), Energy Efficiency Fallacies Revisited, *Energy Policy* 28(6-7), 355-366.
- BMU (2012), Kurzinfo Energieeffizienz, <http://www.bmu.de/themen/klima-energie/energieeffizienz/kurzinfo/>, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abgerufen am 15.02.2013.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2012a), Zeitreihen von Gebietsmitteltemperaturen.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2012b), Alle Klimafaktoren ab Januar 2002 für alle Postleitzahlen (Zustellbezirke).
- GILLINGHAM, K., M.J. KOTCHEN, D.S. RAPSON UND G. WEGNER (2013), The Rebound Effect is Overplayed, *Nature* 493, 475-476.
- GRAVELLE, H. UND R. REES (2004), Microeconomics, 3. Aufl., Financial Times/Prentice Hall, Harlow[u.a.].
- GREENING, L.A., D.L. GREENE AND C. DIFIGLIO (2000), Energy Efficiency and Consumption – the Rebound Effect – a Survey, *Energy Policy* 28(6-7), 389-401.
- HAAS, R. UND P. BIERMAYR (2000), The Rebound Effect for Space Heating. Empirical Evidence from Austria, *Energy Policy* 28(6-7), 403-410.
- HAAS, R. UND L. SCHIPPER (1998), Residential Energy Demand in OECD-Countries and the Role of Irreversible Efficiency Improvements, *Energy Economics* 20(4), 421-442.

- JEVONS, W. S. (1865), *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-Mines*, 3. überarbeitete Auflage 1965, Kelley, New York.
- KHAZZOOM, J. D. (1980), Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances, *Energy Journal* 1(4), 21-40.
- LABUHN, D. UND O. ROMBERG (2009), *Keine Panik vor Thermodynamik: Erfolg und Spaß im klassischen „Drittbrettbohrerfach“ des Ingenieurstudiums*, 4. aktualisierte Auflage, Vieweg und Teubner, Wiesbaden.
- MADLENER, R. UND M. HAUERTMANN (2011), Rebound Effects in German Residential Heating: Do Ownership and Income Matter?, FCN Working Paper No. 2, Aachen.
- MENNEL, T. UND B. STURM (2008), Energieeffizienz – eine neue Aufgabe für staatliche Regulierung?, ZEW Diskussion Paper No. 08-004, Mannheim.
- MILNE, G. UND B. BOARDMAN (2000), Making Cold Homes Warmer: The Effect of Energy Efficiency Improvements in Low-Income Homes, *Energy Policy* 28(6-7), 411-424.
- SCHETTKATT, R. (2011), Analyzing Rebound Effects, in: Bleischwitz, R., P. J. J. Welfens und Z. Zhang (eds.) *International Economics of Resource Efficiency: Eco-Innovation Policies for a Green Economy*, Physica, Heidelberg [u.a.], 253-278.
- SCHULER, A., C. WEBER UND U. FAHL (2000), Energy Consumption for Space Heating of West-German Households: Empirical Evidence, Scenario Projections and Policy Implications, *Energy Policy* 28(12), 877-894.
- SORRELL, S. (2007), *The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-Wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency*, UK Energy Research Centre. <http://www.ukerc.ac.uk/Downloads/PDF/07/0710ReboundEffect/0710ReboundEffectReport.pdf>.
- SORRELL, S. UND J. DIMITROPOULOS (2007), UK ERC Review of Evidence for the Rebound Effect. Technical Report 2: Econometric Evidence, UK Energy Research Centre, London. <http://www.ukerc.ac.uk/Downloads/PDF/07/0710ReboundEffect/0710TechReport2.pdf>.
- SORRELL S. UND J. DIMITROPOULOS (2008), The Rebound Effect: Microeconomic Definitions, Limitations and Extensions, *Ecological Economics* 65(3), 636-649.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012a), Haushalte verbrauchen immer weniger Energie zum Wohnen, Pressemitteilung Nr. 451-12 vom 19.12.2012, Wiesbaden.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012b), Laufende Wirtschaftsrechnungen. Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte, Fachserie 15, Reihe 1, Wiesbaden.

- VAN DEN BERGH, J.C.J.M. (2011), Energy Conservation More Effective With Rebound Policy, *Environmental and Resource Economics* 48(1), 43-58.
- VARIAN, H. R. (2004), Grundzüge der Mikroökonomik, 6. überar. und erw. Aufl., Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München [u.a.].
- VARIAN, H. R. (2010), Intermediate Microeconomics: A Modern Approach, 8. Aufl., Norton, New York [u.a.].