

ERWEITERUNG DER INVESTITIONSENTSCHEIDUNGEN IN DER ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG

Markus Stehle, Markus Blesl

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) – Universität Stuttgart,
Heißbrühlstraße 49a, Tel +49 711 685-87831, Fax +49 711 685-87873,
markus.stehle@ier.uni-stuttgart.de, www.iier.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: An der Transformation des Energiesystems ist eine steigende Zahl und Vielfalt von Akteuren beteiligt. In optimierenden Energiesystemmodellen wird meist jedoch nur die volkswirtschaftliche Sicht, nicht aber die Akteurssicht auf Investitionen berücksichtigt. Eine vergleichende Analyse stellt die Effekte beider Perspektiven am Beispiel eines lokalen Energiesystems gegenüber, wobei die Auswirkungen auf die Ergebnisse hinsichtlich Treibhausgasminde rung bis 2050, diskontierten Systemkosten, spezifischen CO₂-Minderungskosten und Technologieanteilen untersucht werden.

Keywords: Energiesystemanalyse, Akteure, Investitionen, Diskontraten, TIMES

1 Hintergrund und Zielsetzung

An der Transformation des Energiesystems ist eine steigende Zahl und Vielfalt von Akteuren beteiligt. Dabei erfahren vor dem Hintergrund der Wärmewende insbesondere dezentrale, lokale Akteure (z.B. private Haushalte) eine zunehmende Bedeutung für die Dekarbonisierung des Energiesystems. Diese Akteure investieren jedoch nicht im volkswirtschaftlichen Sinne – wie es in optimierenden Energiesystemmodellen oftmals vereinfacht unterstellt wird – sondern besitzen ein eigenes Investitionskalkül im Hinblick auf energierelevante Investitionsentscheidungen. Daraus folgt ein heterogenes Investitionsverhalten, dem auch in der Modellierung eines Energiesystems vor dem Hintergrund des Bedeutungswandels einzelner Akteure Rechnung getragen werden muss. Ziel ist es daher, die volkswirtschaftliche Perspektive in einem ganzheitlichen Energiesystemmodell (Wärme, Strom, Mobilität) nach den unterschiedlichen Sichtweisen der Akteure bei Investitionsentscheidungen zu differenzieren. Damit soll untersucht werden, welche Auswirkungen Akteursentscheidungen auf das Energiesystem haben im Hinblick auf CO₂-Emissionen, diskontierten Systemkosten und spezifischen CO₂-Minderungskosten im Vergleich zur volkswirtschaftlichen Perspektive. Im Weiteren soll der Effekt der Akteursperspektive auf die Technologiewahl und damit auf die Entwicklung der Wärmeversorgung am Beispiel von selbstnutzenden Eigentümern von Wohngebäuden analysiert und dem kostenoptimalen Ausbaupfad der volkswirtschaftlichen Perspektive vergleichend gegenübergestellt werden.

2 Das Stadtmodell TIMES Local

Das mit dem Modellgenerator TIMES (The Integrated MARKAL EFOM System) (ETSAP 2002) entwickelte Stadtmodell TIMES Local (Blesl 2014) ist ein lineares Optimierungsmodell mit dem Ziel die diskontierten Systemkosten für den Ausbau des lokalen Energiesystems zu minimieren, wobei ggf. energiepolitische Vorgaben in Form von

Restriktionen wie z.B. Treibhausgas-Minderungsziele zu erfüllen sind. Betrachtet wird eine aggregierte Modellregion im Zeitraum von 2010 bis 2050 in 5-Jahresschritten. Das lokale Energiesystem ist Bottom-up über ein sog. Referenzenergiesystem (RES) repräsentiert (s. Abbildung 1), in dem Güter (z.B. Energieträger) und Prozesse (z.B. Technologien) über Verknüpfungen miteinander verbunden sind (Remme 2006). Die Energienachfrage der Sektoren (private Haushalte, GHD, Industrie und Verkehr), die über unterschiedliche im Wettbewerb stehende Prozesse und Güter entlang des Energieflusses innerhalb des Energiesystems (von Primärenergie bis hin zu Nutzenergie) gedeckt werden kann, beeinflusst die lokale Energieversorgungsstruktur.

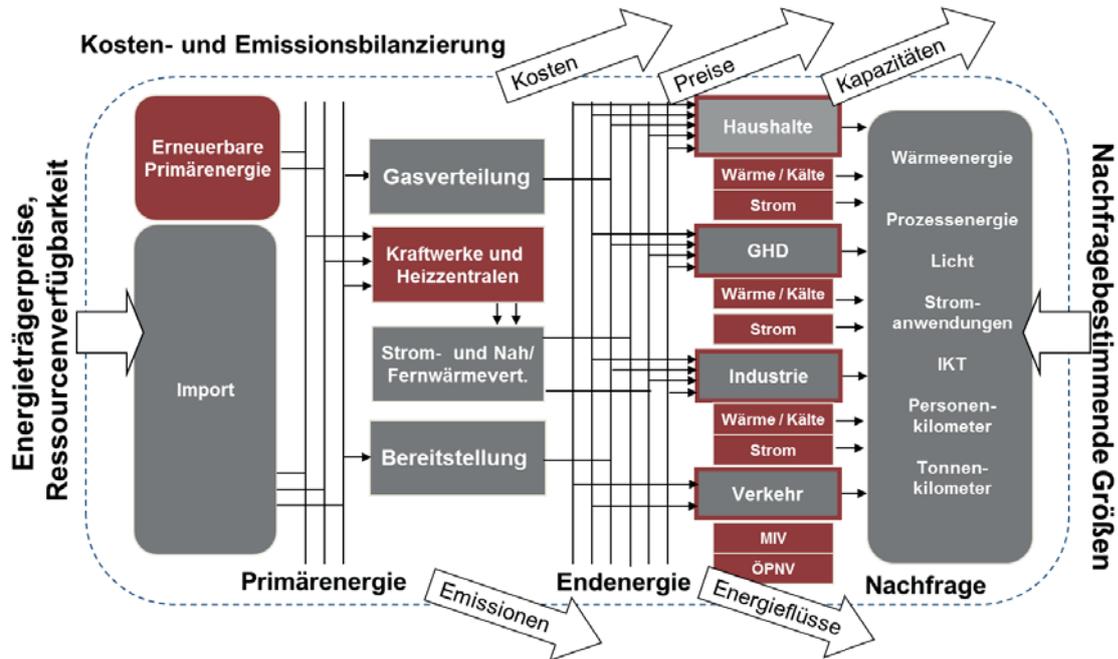


Abbildung 1: Das Referenzenergiesystem des Energiesystemmodells TIMES Local

3 Methodik

Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise beschrieben, auf deren Grundlage die modellgestützte Szenarioanalyse erfolgt, um die Effekte der Akteursperspektive auf die Entwicklung der lokalen Energieversorgungsstruktur zu untersuchen.

Ziel der Akteurssicht auf im Modell zu treffende Investitionsentscheidungen ist ein vertieftes Systemverständnis zu gewinnen, um die Effekte unterschiedlicher Investitionskalküle der Akteure auf die Entwicklung des Energiesystems analysieren und bewerten zu können, so dass ggf. Maßnahmen für eine erfolgreiche Transformation des Energiesystems abgeleitet werden können.

3.1 Investitionsentscheidung

Die Investitionsentscheidung im Energiesystemmodell TIMES Local erfolgt auf Basis der annuitätischen Vollkostenrechnung, wobei die Kostengruppen Kapitalkosten (kapitalgebundene Kosten), Fixkosten für Betrieb und Instandhaltung (betriebsgebundene Kosten) und variable Kosten (bedarfsgebundene Kosten) unterschieden werden (vgl. VDI 2067 2012). Unterscheiden sich die technologische Nutzungsdauer und der

Betrachtungszeitraum, sind zudem Restwerte bei den Kapitalkosten zu berücksichtigen. Zahlungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen (z.B. Investitionsausgaben und variable Kosten) können verglichen werden, in dem sie auf ein Basisjahr diskontiert werden. Der Annuitätenfaktor (Kehrwert des Rentenbarwertfaktors) überführt den Kapitalwert in gleichbleibende Zahlungen (Annuitäten). Durch Betrachtung der Annuitäten werden Investitionen in Technologien mit unterschiedlichen Nutzungsdauern vergleichbar gemacht. Die Höhe der Diskontierung auf das Basisjahr hängt von der Diskontrate bzw. dem internem Zinssatz i ab. Dabei ist der Wert zukünftiger Zahlungen umso geringer, je höher die Diskontrate gewählt wird.

$$KW_0 = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

$$a = KW_0 \cdot a_f$$

mit KW_0 : Kapitalwert, C_t : Barwert zum Zeitpunkt t , i : Diskontrate bzw. interner Zinssatz, n : Betrachtungszeitraum in Jahren, a : Annuität, a_f : Annuitätenfaktor ($a_f = \frac{q-1}{1-q^{-n}}$ mit $q = 1 + i$)

Grundsätzlich sind in TIMES zwei Diskonraten zu unterscheiden (Loulou et al. 2016). Zum einen gibt es für das Energiesystem eine allgemeine Diskontrate (engl. social discount rate), die auf alle Kostengruppen wirkt (Kapitalkosten, Fixkosten für Betrieb und Instandhaltung, variable Kosten). Zum anderen gibt es für die Prozesse eine spezifische Diskontrate (engl. hurdle rate), die aber nur die Kapitalkosten eines Prozesses beeinflusst. Die Diskontrate bestimmt neben der absoluten Höhe der Annuität auch die relative Gewichtung der einzelnen Kostengruppen zueinander. Je höher die allgemeine Diskontrate gewählt wird, desto stärker liegt die Gewichtung auf den Kapitalkosten. Entsprechend kommen vermehrt Technologien mit geringen Kapitalkosten zum Einsatz. Die prozessspezifische Diskontrate hingegen beeinflusst direkt nur die absolute Höhe der Annuität der Investitionsausgaben für eine Technologie, indirekt aber wirkt sie damit aber auf die relative Gewichtung der Annuitäten der unterschiedlichen Kostengruppen und auf die absolute Höhe der gesamten Annuität.

In TIMES-Modellen wird oftmals nur eine allgemeine Diskontrate ohne prozessspezifische Diskonraten betrachtet. In manchen Ansätzen werden diese noch nach technologiespezifischen Diskonraten differenziert (z.B. Garcia et al. 2016). Nicht betrachtet wird jedoch, dass Akteure unterschiedliche Investitionskalküle haben. Daher sollen im Folgenden akteursspezifische Diskonraten in den Fokus gerückt und berücksichtigt werden, um die Investitionsentscheidungen im Modell um die Akteursperspektive zu erweitern.

3.2 Investoren und Investitionsobjekte

Im Folgenden werden die Investitionskalküle der unterschiedlichen Nachfragesektoren als auch der selbstnutzenden Eigentümer und Vermieter von Wohn- und Nichtwohngebäuden differenziert.

Wirtschaftssubjekte mit ähnlichem Verhalten werden zu Sektoren subsumiert (Schrüfer 2010). Daher sind im Energiesystemmodell TIMES Local die Investitionskalküle nach den Sektoren zu differenzieren: private Haushalte, Gewerbe, Handel und

Dienstleistungen (GHD), Industrie und Verkehr. Es soll dabei angenommen werden, dass die privaten Haushalte eine Diskontrate von 3 %, der GHD-Sektor 8 %, der Industrie-Sektor 15 % und der Verkehrssektor in Abhängigkeit des Nutzers (privat, gewerblich) 3 bis 8 % ansetzen (s. Abbildung 2). Die im Vergleich zum Haushaltssektor höher angesetzten Diskontraten für GHD und Industrie sollen die unterschiedlichen Zeit- und Risikopräferenzen der Sektoren zum Ausdruck bringen. Dabei impliziert ein hoher Zinssatz eine hohe Zeitpräferenz und einen hohen Risikozuschlag für Investitionen. Beides ist für die wirtschaftlichen Sektoren GHD und Industrie im Vergleich zum Haushaltssektor als ausgeprägter anzunehmen.

Weiterhin besteht hinsichtlich des Investitionskalküls ein grundsätzlicher Unterschied darin, ob ein Investor auch der Nutzer der Energiedienstleistung ist (sog. Nutzer-Investor-Dilemma bzw. Vermieter-Mieter-Dilemma). So ist die Diskontrate für den Vermieter deutlich höher anzusetzen als beim selbstnutzenden Eigentümer, da der Vermieter nicht einen unmittelbaren Nutzen aus der Investition zieht (in Form von eingesparten Heizkosten, verbessertem Wohnkomfort, etc.). Diese Unterscheidung wird im Folgenden für die Selbstnutzer und Vermieter von Wohn- und Nichtwohngebäuden vorgenommen. Die allgemeine Diskontrate soll mit 7,5 % angenommen werden.

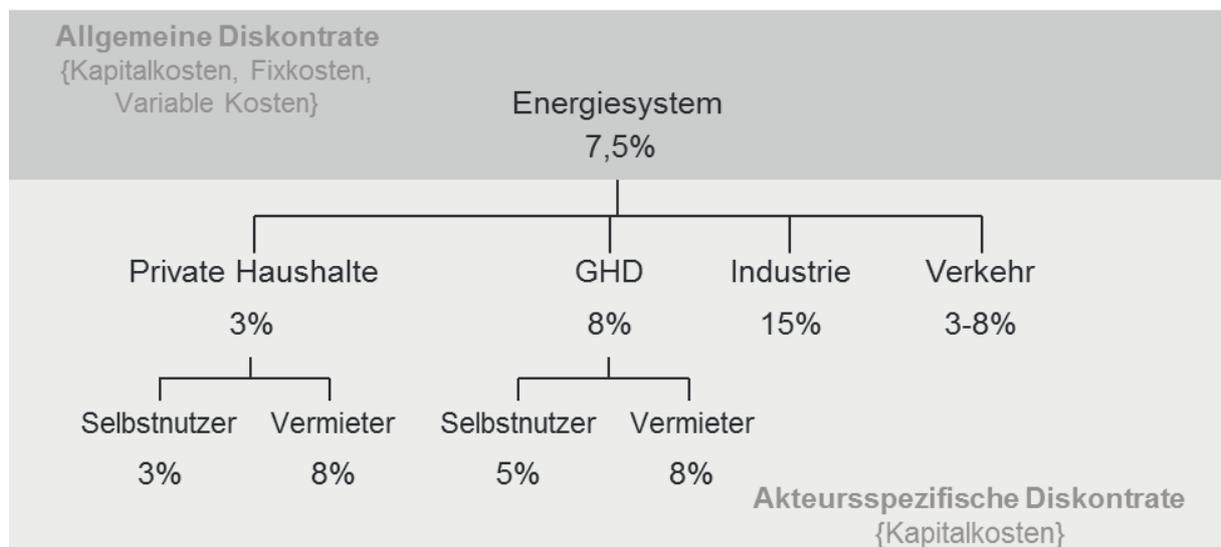


Abbildung 2: Angenommene Diskontraten für Investitionen in Abhängigkeit des Sektors und Akteurs

Die modelltechnische Abbildung der selbstnutzenden Eigentümer und Vermieter erfolgt über eine Zuordnung zu den bereits im Modell unterschiedenen Wohngebäudetypen. So wird vereinfacht angenommen, dass die Einfamilienhäuser (EFH) ausschließlich von den Eigentümern genutzt werden und die Mehrfamilienhäuser (MFH) ausschließlich von Mietern bewohnt sind. Jeder Wohngebäudetyp verfügt zudem über ein eigenes Portfolio an Technologien, so dass die Investitionsentscheidungen des selbstnutzenden Eigentümers und des Vermieters differenziert werden können. Damit besitzen beide Investortypen jeweils ein eigenes Investitionsportfolio, aus dem die präferierten Alternativen gewählt werden können (unter Berücksichtigung der Restriktionen des lokalen Energiesystems).

Als Investitionsobjekte stehen folgende in Wettbewerb stehende Optionen der energetischen Modernisierung in Gebäuden zur Verfügung:

- Wärmeerzeuger zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser, wobei differenziert wird zwischen singulären und dualen Technologien. Duale Technologien stellen Raumwärme und Warmwasser bereit, während bei singulären nur eines der beiden Produkte erzeugt wird.
- Gebäudedämmung zur Reduktion des Nutzwärmebedarfs (außerhalb des Sanierungszyklus)

Während für die Gebäudedämmung vier Sanierungsstufen zur Berücksichtigung von Teilmodernisierungen abgebildet sind, konkurriert innerhalb der Wärmeerzeuger ein ganzes Portfolio an Technologien (Brennwert-Kessel, Wärmepumpen, elektrischer Heizstab, etc.), die sich zudem nach verwendeten Energieträgern (Erdgas, Heizöl, Biodiesel, Nahwärme, Pellets, solare Wärme, Umweltwärme, etc.) unterscheiden.

4 Modellgestützte Szenarioanalyse

Ziel der folgenden Szenarioanalyse ist es, die unterschiedlichen Entwicklungen des Energiesystems je nach volkswirtschaftlicher Sicht oder Akteurssicht vergleichend gegenüberzustellen und zu bewerten hinsichtlich Treibhausgas-Minderung bis 2050, diskontierten Systemkosten, spezifischen CO₂-Minderungskosten sowie Technologieanteilen. Dabei wird ein Zeithorizont von 2010 bis 2050 betrachtet.

4.1 Modellregion

Die Modellregion umfasst ein Siedlungsgebiet, das nach (BBSR 2009) charakteristisch ist für einen verstädterten Raum: die Stadt Metzingen im Landkreis Reutlingen in Baden-Württemberg. Der Gebäudebestand der 22.000 Einwohner zählenden Mittelstadt umfasst ca. 4.800 Wohngebäude und 1.000 Nichtwohngebäude (Zensus 2011). Dabei sind etwa 80 % den EFH (inkl. Reihenhäuser) zuzuordnen. Dennoch ist der Raumwärmebedarf zwischen EFH (selbstnutzende Eigentümer, ca. 200 TJ/a) und MFH (Vermieter, ca. 180 TJ/a) relativ ähnlich verteilt.

4.2 Rahmenannahmen und Szenariodefinition

Die Referenzentwicklung des Nutzenergiebedarfs ist exogen vorgegeben und orientiert sich u.a. an der Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung der betrachteten Modellregion. Während die Technologiepreise auf der Grundlage von recherchierten Kostendaten unterschiedlicher Hersteller basieren, lehnen sich die Energieträgerpreise an die Angaben des (WEO 2015) an. Die Entwicklung des Emissionsfaktors des Bundesstrommixes basiert auf eigenen Berechnungen und ist angelehnt an die Energiereferenzprognose (Schlesinger et al. 2014).

Es werden folgende Szenarien vergleichend betrachtet, wobei jeweils ein Business As Usual-Szenario (BAU) und ein Klima-Szenario (KLIM) unterschieden wird (s. Tabelle 1): Optimierung ohne Akteurssicht (BAU, KLIM) und Optimierung unter Berücksichtigung der

Akteurssicht (BAU_A, KLIM_A) sowie Optimierung unter Berücksichtigung der Akteurssicht und von Investitionshemmnissen (BAU_A_{Hem}, KLIM_A_{Hem}).

Tabelle 1: Definition der betrachteten Szenarien ohne (BAU, KLIM) und mit Akteurssicht (BAU_A, KLIM_A) sowie mit Akteurssicht & Investitionshemmnissen (BAU_A_{Hem}, KLIM_A_{Hem})

Szenario	Name	Zinssatz $i_{\text{Allgemein}}$	Zinssatz i_{Sektor}	Zinssatz i_{Akteur}		CO ₂ -Ziel 2050
				Wohngebäude	Nichtwohng.	
BAU	Business As Usual	7,5 %	-	-	-	-
KLIM	Klima-Szenario					90 % THG- Reduktion
BAU_A	BAU mit Akteurssicht	7,5 %	s. Abb. 2	Selbstnutzer: 3 %, Vermieter: 8 %	Selbstnutzer: 5 %, Vermieter: 8 %	-
KLIM_A	KLIM mit Akteurssicht					90 % THG- Reduktion
BAU_A _{Hem}	BAU_A mit Invest.-hem.	7,5 %	s. Fußnote ¹	Selbstnutzer: 15 %, Vermieter: 25 %	Selbstnutzer: 20 %, Vermieter: 25 %	-
KLIM_A _{Hem}	KLIM_A mit Invest.-hem.					90 % THG- Reduktion

Das Business-As-Usual-Szenario (BAU) zeigt die volkswirtschaftliche Perspektive auf die Investitionsentscheidungen auf, wobei die Systemkosten der Energieversorgungsstruktur bis 2050 minimiert werden. Im Gegensatz zum BAU-Szenario beinhaltet das Klima-Szenario (KLIM) als Restriktion ein CO₂-Minderungsziel von 90 % bis 2050 gegenüber 1990 (THG-Minderungsziel von Baden-Württemberg), das von den möglichen Ausbaupfaden des Energiesystems einzuhalten ist. Die weiteren Szenarien (BAU_A, KLIM_A) beinhalten eine Akteursperspektive hinsichtlich der optimalen Investitionsentscheidung für die Entwicklung des Energiesystems.

Das Treibhausgas-minderungs-Ziel in den KLIM-Szenarien schränkt dabei die Freiheitsgrade bzw. den Spielraum des Modells ein. Es ist daher zu erwarten, dass das KLIM-Szenario aufgrund dieser Restriktion hinsichtlich der Technologiewahl weniger von der Akteurssicht beeinflusst wird als das BAU-Szenario.

Im Weiteren werden in Abschnitt 4.3.1 zwei weitere Szenarien (BAU_A_{Hem}, KLIM_A_{Hem}) betrachtet, die eine Parametervariation der akteurspezifischen Zinssätze beinhalten, um mögliche Investitionshemmnisse der Akteure zu berücksichtigen.

4.3 Szenarienergebnisse

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse untergliedern sich in eine ganzheitliche Szenarioanalyse der diskontierten Systemkosten, CO₂-Emissionen und spezifischen CO₂-Minderungskosten sowie in die Analyse der Technologieanteile je Wirtschaftssubjekt (Selbstnutzer, Vermieter) im privaten Haushaltssektor.

¹ Akteurssicht mit Investitionshemmnissen: Haushalte: 15 % {Selbstnutzer: 15 %, Vermieter: 25 %}, GHD: 25 % {Selbstnutzer: 20 %, Vermieter: 25 %}, Industrie: 30 %, Verkehr: 15-25 %; z.T. angelehnt an (Garcia et al. 2016)

4.3.1 Systemkosten, CO₂-Emissionen, CO₂-Minderungskosten

Die Ergebnisse der modellgestützten Szenariorechnungen sind in Tabelle 2 vergleichend gegenübergestellt, wobei für die Akteursperspektive spezifische Diskontraten der Nachfragesektoren und zusätzlich für die selbstnutzenden Eigentümer und Vermieter von Wohn- und Nichtwohngebäuden angenommen wurden (s. Abschnitt 3.2).

Der Einfluss der Akteursperspektive auf die diskontierten Systemkosten, CO₂-Emissionen im Zieljahr und die spezifischen CO₂-Vermeidungskosten fällt zunächst nicht signifikant aus für die angenommenen akteurspezifischen Diskontraten für die vorliegende Fallstudie. So beziffert sich die zusätzliche CO₂-Minderung im BAU_A-Szenario auf 3 %-Punkte gegenüber dem BAU-Szenario. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der akteurspezifische Zinssatz im Mittel geringer angesetzt ist als die allgemeine Diskontrate. Damit werden tendentiell kapitalintensivere Investitionen begünstigt (wie z.B. erneuerbare Energien, Gebäudedämmung). Die auf das Basisjahr diskontierten Systemkosten fallen in den Szenarien mit Akteurssicht (BAU_A, KLIM_A) gegenüber dem BAU- und KLIM-Szenario entsprechend geringer aus (um jeweils ca. 6 %). Da das Verhältnis der Deltas der Systemkosten und CO₂-Minderungen zwischen den BAU- und KLIM-Szenarien in beiden Fällen in etwa gleich ausfällt, belaufen sich die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Vermeidungskosten auf einen ähnlichen Betrag in Höhe von 22 EUR₂₀₁₀/t CO₂ für die vorliegende Fallstudie.

Tabelle 2: Szenarienergebnisse im Vergleich

		Ohne Akteurssicht		Mit Akteurssicht		Mit Akteurssicht & Investitions-hemmnissen	
		BAU	KLIM	BAU_A	KLIM_A	BAU_A _{Hem}	KLIM_A _{Hem}
CO ₂ -Reduktion gg. 1990	%	- 53	Ziel	- 56	Ziel	- 46	Ziel
Diskontierte Systemkosten	Mrd. EUR ₂₀₁₀	1,89	1,92	1,78	1,81	2,22	2,27
∅ spez. CO ₂ -Vermeidungskosten ²	EUR ₂₀₁₀ /t CO ₂	Referenz	22,0	Referenz	21,7	Referenz	31,6
	Index KLIM		100		98		143

Neben den Effekten der Akteurssicht auf Energiesystemebene, schlägt sich die Akteurssicht auch in der sektoralen Betrachtung nieder. So ergibt sich infolge der Berücksichtigung heterogener Investitionskalküle im BAU_A-Szenario eine verstärkte CO₂-Reduktion (-72 %) der privaten Haushalte in 2050 gegenüber dem BAU-Szenario, während die Wirtschaftssektoren jeweils einen geringen Anstieg verzeichnen (+7 % GHD-Emissionen, +4 % Industrie-Emissionen). Auch im KLIM_A-Szenario findet eine Verschiebung der CO₂-Emissionen statt: Von den Industrie-Emissionen (+37 %) hin zu den privaten Haushalten (-32 %). Daraus ergeben sich andere Dekarbonisierungspfade des Energiesystems als in einer rein volkswirtschaftlichen Betrachtung, die in Abschnitt 4.3.2 am

² Die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Vermeidungskosten ergeben sich aus den Deltas zwischen dem jeweiligen BAU- und KLIM-Szenario hinsichtlich der diskontierten Systemkosten und den bis 2050 kumulierten CO₂-Emissionen.

Beispiel des selbstnutzenden Eigentümers von Wohngebäuden vergleichend gegenübergestellt werden.

Die bisherige Akteursperspektive berücksichtigt mit den sektoralen und akteurspezifischen Diskontraten die Risiko- und Zeitpräferenz der Akteure. Nicht berücksichtigt sind jedoch Investitionshemmnisse wie z.B. Kapitalverfügbarkeit. Daher wird in einem weiteren Akteursszenario (BAU_A_{Hem}, KLIM_A_{Hem}) eine stärkere Gewichtung der Kapitalkosten vorgenommen (durch die Wahl höherer Diskontraten). Damit ergibt sich für die Ergebnisse nun folgendes Bild. Die CO₂-Reduktion im Zieljahr des BAU_A_{Hem}-Szenarios weicht nun stärker ab, so dass nur noch 87 % der CO₂-Reduktion im BAU-Szenario ohne Akteurssicht erreicht wird. Während die diskontierten Systemkosten des KLIM_A_{Hem}-Szenarios infolge der höheren Diskontraten um 18 % höher ausfallen als im KLIM-Szenario ohne Akteurssicht, beträgt der Anstieg der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Vermeidungskosten über 43 % (32 EUR₂₀₁₀/t CO₂). Dies liegt auch darin begründet, dass infolge der höheren akteurspezifischen Zinssätze die Kapitalkosten stärker gewichtet werden. Kapitalintensive Investitionsoptionen wie erneuerbare Technologien werden daher vom Modell weniger gezogen, womit eine geringere CO₂-Reduktion einhergeht.

Die Variation der Akteursparameter zeigt, dass mit steigendem Delta zwischen allgemeiner Diskontrate und akteurspezifischen Diskontraten die Effekte ausgeprägter sind, sich aber unterschiedlich stark auf die untersuchten Variablen auswirken. So änderten sich die diskontierten Systemkosten und CO₂-Emissionen in deutlich geringerem Maße als die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Minderungskosten (im Vergleich zu den Szenarien ohne Akteurssicht).

Eine Schlussfolgerung aus der Szenarioanalyse der vorliegenden Fallstudie ist, dass die relativen Aufwendungen für den Klimaschutz erheblich größer ausfallen können, wenn die Investitionsausgaben in der Investitionsentscheidung stärker gewichtet werden (z.B. aufgrund von Hemmnissen wie Kapitalverfügbarkeit). Vor diesem Hintergrund erscheint es bei der Entwicklung von Klimaschutzmaßnahmen sinnvoll die Akteursperspektive als auch spezifische Hemmnisse zu berücksichtigen.

4.3.2 Technologienanteile nach Wirtschaftssubjekten (Selbstnutzer, Vermieter)

Im Folgenden werden die Effekte der Akteurssicht auf die Technologiewahl und damit die Entwicklung des Energiesystems untersucht. Dies soll am Beispiel des selbstnutzenden Eigentümers für die Wahl von Investitionsobjekten zur energetischen Modernisierung (Heiztechnologien, Wärmedämmung) von Wohngebäuden erfolgen. Dabei wird die Entwicklung der Wärmeversorgung von 2010 bis 2050 betrachtet, wobei die Stützjahre 2020 und 2035 berücksichtigt werden. Es werden dabei die Ergebnisse der Szenarien BAU, KLIM und BAU-A, KLIM_A vergleichend gegenübergestellt (s. Abbildung 3). Zunächst werden der Ausgangszustand im Basisjahr sowie die Entwicklung bis 2015 geschildert, bevor die Szenarioergebnisse im Weiteren vorgestellt werden.

Die Wärmeversorgung der EFH der betrachteten Modellregion ist im Ausgangszustand dominiert von den Energieträgern Erdgas und Heizöl, aus denen zusammen über 80 % der Raumwärme bereitgestellt werden. Dabei herrschen technologisch vor allem noch die Niedertemperaturkessel vor. Weitere Energieträgeranteile sind in absteigender Reihenfolge die Nahwärme, Holzpellets und sonstige (elektrische Speicherheizungen, Erdwärmepumpe,

Luftwärmepumpe). Die weitere Entwicklung in 2015 ist bestimmt durch einen Technologiewechsel von Niedertemperatur- zu den effizienteren Brennwertkesseln bei ähnlich bleibendem Energiemix.

Die weitere Entwicklung über die Stützjahre 2020 und 2035 bis zum Zieljahr 2050 wird anhand der Szenarien vorgestellt. Die Akteursperspektive beeinflusst den Technologiemix zur Raumwärmebereitstellung in EFH folgendermaßen: Im BAU_A-Szenario kommen energetische Gebäudesanierungsmaßnahmen (außerhalb des Sanierungszyklus) zur Reduktion des Raumwärmebedarfs im Zieljahr 2050 (-35 %) in erheblichem Maße zum Einsatz, während im BAU-Szenario ohne Akteurssicht weniger kapitalintensive Investitionen noch vor den Sanierungsmaßnahmen gezogen werden. Der Energiemix als auch Technologiemix in 2050 verhält sich in beiden Szenarien (BAU, BAU_A) jedoch sehr ähnlich, mit der Ausnahme, dass im Fall der Akteurssicht Erdwärmepumpen zum Zuge kommen und im BAU-Szenario solare Gas-Brennwert-Systeme. Zudem zeigt sich im BAU_A-Szenario für das Stützjahr 2035 eine ausgeprägtere Gebäudesanierung als im KLIM-Szenario ohne Akteurssicht. In letzterem werden der Sanierung die CO₂-neutralen Pelletkessel vorgezogen.

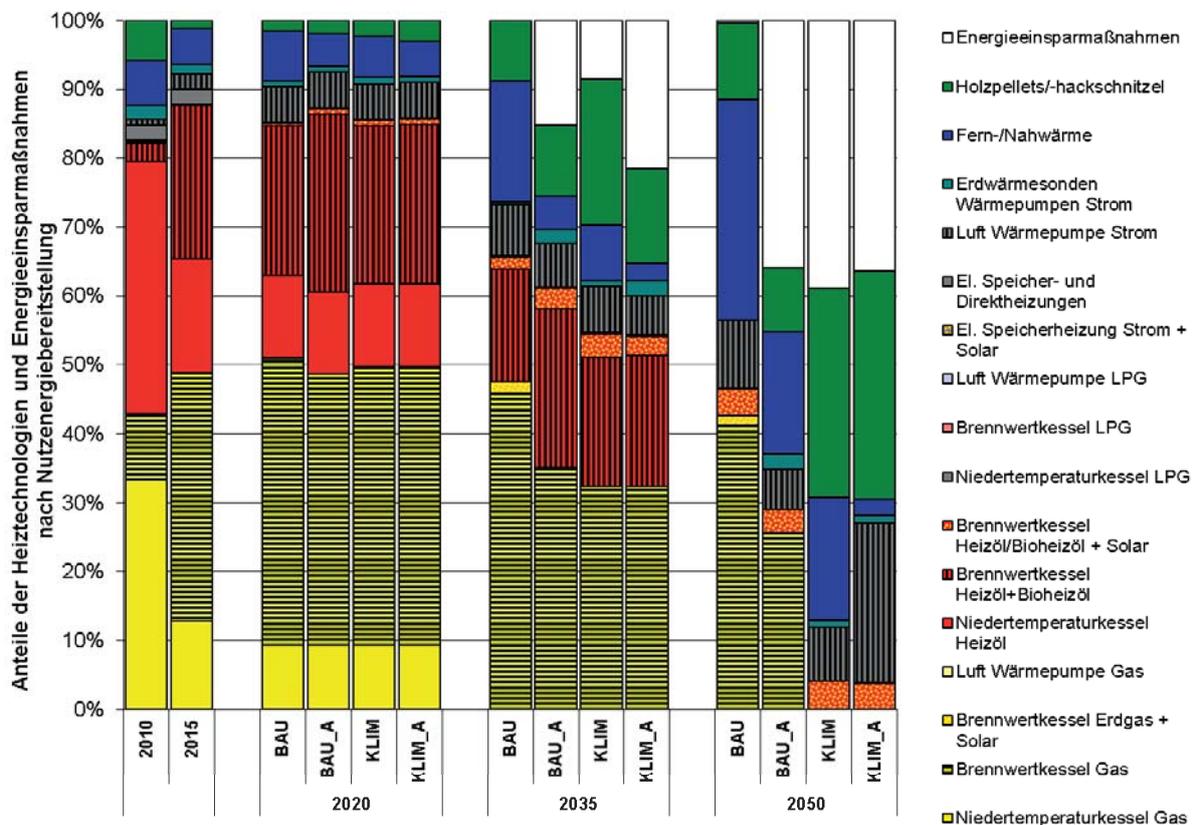


Abbildung 3: Nutzenergiebereitstellung nach Anteilen der Heizungstypen und Berücksichtigung von Energieeinsparmaßnahmen (energetische Gebäudesanierung außerhalb des Sanierungszyklus) am Beispiel der selbstnutzenden Eigentümer von Wohngebäuden im Szenariovergleich

Der Effekt der Akteurssicht auf das KLIM-Szenario ist durch die CO₂-Restriktion weniger stark ausgeprägt. So kommen aufgrund der CO₂-Restriktion in beiden KLIM-Szenarien energetische Gebäudesanierungsmaßnahmen zum Einsatz, wobei das Sanierungspotential im Zieljahr 2050 fast bzw. vollständig ausgeschöpft wird (-37,5 %). Während die Anteile von Pelletkessel, solaren Heizöl-Brennwert-Systemen und Erdwärmepumpen ähnlich ausfallen,

wird im KLIM_A-Szenario die strombetriebene Luftwärmepumpe gegenüber der Nahwärme begünstigt, so dass sich der Anteil der Luftwärmepumpen verdreifacht und der Anteil der Nahwärme nur noch 1/5 beträgt im Vergleich zum KLIM-Szenario ohne Akteurssicht.

Zudem zeichnen sich in allen Szenarien folgende Tendenzen ab: Eine zunehmende Durchdringung der Pelletkessel sowie eine Verdrängung der heizölbasierten Wärmeversorgung bis 2050. Im Fall der KLIM-Szenarien reicht vor dem Hintergrund des 90 % igen CO₂-Minderungsziels selbst die klimafreundlichere gasbasierte Wärmeversorgung nicht mehr aus und wird daher im Zieljahr von den anderen Energieträgern verdrängt. Sie kommt daher im Falle der vorliegenden Modellregion nur noch zur Bereitstellung von Nahwärme zum Einsatz (zusammen mit Biomasse und solarthermischen Anlagen).

Die Technologiewahl der Vermieter soll an dieser Stelle nur kurz behandelt werden. Der Unterschied zwischen volkswirtschaftlicher Perspektive und Akteursperspektive fällt durch die angenommenen Zinssätze ($i_{\text{Vermieter}} = 8\%$, $i_{\text{Allgemein}} = 7,5\%$) gering aus. Es bestehen jedoch unabhängig von der Akteurssicht Unterschiede in der Technologiewahl zwischen EFH und MFH, so dass sich hier für den Vermieter ein anderer Technolgiemix in 2050 ergibt als für den Selbstnutzer. So kommt im Vermieter-BAU-Szenario verstärkt Nahwärme zugunsten von Gas-Brennwertkesseln und energetischer Gebäudesanierung zum Einsatz.

5 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die Investitionsentscheidungen wurden im Energiesystemmodell TIMES Local um akteurspezifische Diskontraten erweitert. Neben den Nachfragesektoren wurde auch das Investitionskalkül von selbstnutzenden Eigentümern und Vermietern von Wohn- und Nichtwohngebäuden differenziert. Die Akteursperspektive ermöglicht die Analyse und Bewertung der Effekte unterschiedlicher Investitionskalküle auf die Entwicklung des Energiesystems hinsichtlich CO₂-Emissionen, diskontierten Systemkosten und Technologieanteilen. Der Effekt dieser Differenzierung im Vergleich zur volkswirtschaftlichen Perspektive ohne Akteurssicht auf die Entwicklung des Energiesystems wurde für eine Modellregion mit Zeithorizont bis 2050 in einer Szenarioanalyse untersucht. Die Berücksichtigung von akteurspezifischen Diskontraten führte zunächst zu keinen signifikanten Effekten auf die Höhe der CO₂-Emissionen im Zieljahr (- 7 %), der diskontierten Systemkosten (- 6 %) (jeweils in den BAU-Szenarien) und der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Vermeidungskosten (- 2 %) im Vergleich zur rein volkswirtschaftlichen Perspektive.

In einem weiteren Akteurs-Szenario wurden die Kapitalkosten stärker gewichtet, um Investitionshemmnisse (z.B. Verfügbarkeit von Kapital) implizit zu berücksichtigen. Dabei fallen die Auswirkungen der Akteursperspektive auf die Ergebnisvariablen nicht nur signifikanter aus, sondern sie verteilen sich auch anders. So änderten sich die CO₂-Emissionen im Zieljahr (+ 14 %) und die diskontierten Systemkosten (+ 18 %) in deutlich geringerem Maße als die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Vermeidungskosten (+ 43 %) im Vergleich zum BAU-Szenario ohne Akteurssicht. Dabei zeigt sich, dass infolge der stärkeren Gewichtung der Kapitalkosten der Akteure die Aufwendungen für den Klimaschutz erheblich größer ausfallen können im Vergleich zur volkswirtschaftlichen Perspektive.

Weiterhin wurde der Effekt der Akteursperspektive auf die Technologiewahl und die Entwicklung der Energieversorgungsstruktur am Beispiel des selbstnutzenden Eigentümers von Wohngebäuden untersucht. Dabei kommen mit Akteurssicht verstärkt energetische Gebäudesanierungen zum Zuge, während der verbleibende Raumwärmebedarf in beiden BAU-Szenarien (ohne und mit Akteurssicht) von einem ähnlichen Technologiemix bereitgestellt wird. In den KLIM-Szenarien hingegen kommen infolge der Akteursperspektive verstärkt strombetriebene Luft-Wärmepumpen zugunsten der Nahwärme zum Einsatz. Im Weiteren zeigte sich, dass das Nutzer-Investor-Dilemma über die Wahl unterschiedlicher Zinssätze abgebildet werden konnte. So werden vom Modell im Falle des Vermieters im BAU-Szenario keine energetischen Gebäude-sanierungsmaßnahmen gezogen, da Investitionsoptionen mit geringen Kapitalkosten begünstigt werden (z.B. Nahwärme).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die nach Akteuren differenzierten Investitionsentscheidungen des Energiesystems ein vertieftes Systemverständnis hinsichtlich der Effekte heterogener Investitionskalküle ermöglichen. Darauf aufbauend können Erkenntnisse für die Ableitung von akteursspezifischen Maßnahmen zur CO₂-Minderung gewonnen werden, um die Treffsicherheit als auch die Wirkungstiefe von klimapolitischen Instrumenten zu verbessern.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Wahl der Diskontraten ($i_{\text{Allgemein}}$, i_{Akteur}) sowie der Relationen jeweils zueinander. Daran schließt sich eine Sensitivitätsanalyse der Diskontraten an, um zu untersuchen, wie groß die Effektausprägungen sich jeweils auf die Ergebnisvariablen darstellen. Desweiteren ist zu überlegen, eine Budgetlimitierung der Akteure je Zeitperiode zu implementieren und damit das Investitionsbudget im Modell zu begrenzen. Im Weiteren können klimapolitische Instrumente, wie z.B. eine CO₂-Steuer, akteursspezifisch bewertet werden.

Die Erweiterung der Investitionsentscheidung beschränkte sich im vorliegenden Paper auf die differenzierte Betrachtung von monetären Größen wie der Diskontrate zur Berücksichtigung der Akteurssicht. Jedoch umfassen die entscheidungsrelevanten Parameter in Investitionsentscheidungen nicht nur monetäre Größen. Vielmehr basieren Investitionsentscheidungen auf einem multidimensionalen Zielsystem der Akteure, die mit einem multikriteriellen Bewertungsverfahren berücksichtigt werden können. Aus dieser Sichtweise heraus ergeben sich präferenzorientierte Investitionsentscheidungen, die z.B. über die Nutzwertanalyse (vgl. Zangemeister 1976) von Investitionsoptionen in Abhängigkeit der Akteurspräferenzen abgebildet werden können.

Literatur

- (BBSR 2009) Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Raumb Beobachtung, 2009.
- (Blesl 2014) Blesl, M.: Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2011.
- (ETSAP 2002) Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP): International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme: Contributing to the Kyoto Protocol, Summary of Annex VII (1999-2002), 2002.
- (Garcia et al. 2016) Garcia-Gusano, D., Espegren, K., Lind, A., Kirkengen, M.: The role of the discount rates in energy systems optimisation models, Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (2016) 56-72, 2016.
- (Loulou et al. 2016) Loulou, R., Lehtilä, A., Kanudia, A., Remme, U., Goldstein, G.: Documentation for the TIMES Model Part II. Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), 2016.
- (Remme 2006) Remme, U.: Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell, Dissertation, Stuttgart, 2006.
- (Schlesinger et al. 2014) Schlesinger, Michael et al.: Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose. Basel, Köln, Osnabrück, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2014.
- (Schrüfer 2010) Schrüfer, K.: Allgemeine Volkswirtschaftslehre, 3. Auflage, Berlin, 2010.
- (VDI 2067 2012) Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Richtlinie 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Blatt 1, 2012.
- (WEO 2015) International Energy Agency: World Energy Outlook 2015.
- (Zangemeister 1976) Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, 1976.
- (Zensus 2011) [Online] <https://www.zensus2011.de/DE/>, 2011.